



Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux.

Elise Wiederkehr, Simon Dufour, Hervé Piégay

► To cite this version:

Elise Wiederkehr, Simon Dufour, Hervé Piégay. Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux. : Synthèse des connaissances et extraction d'indicateurs.. 2008. hal-00828825

HAL Id: hal-00828825

<https://hal.science/hal-00828825>

Submitted on 4 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Apport des techniques d'imagerie
pour la caractérisation physique des corridors fluviaux.
Synthèse des connaissances et extraction d'indicateurs.**

Rapport final

Fiche action recherche valorisation n°A 6.

E. Wiederkehr, S. Dufour et H. Piégay
Avril 2008



Rappel des objectifs :

L'objectif visé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau est d'atteindre, d'ici 2015, le **bon état écologique de tous les milieux aquatiques naturels**. Ce dernier s'évalue à partir de la biologie, qui résulte en partie des conditions physico-chimiques et hydromorphologiques des masses d'eau.

Afin d'atteindre ce bon état, il est donc essentiel de connaître et de comprendre les paramètres influençant la dynamique fluviale pour pouvoir, par la suite, intervenir efficacement sur les habitats. Il semble donc nécessaire de faire un **état des lieux des conditions hydromorphologiques** du territoire. D'où la nécessité de mettre en place des outils permettant de **renseigner les indicateurs de qualité physique des milieux aquatiques**.

Les progrès techniques qui ont été faits ces dernières années dans le domaine de la télédétection laissent entrevoir des pistes prometteuses. De fait, l'utilisation de la télédétection dans le cadre d'un travail de caractérisation physique d'un réseau hydrographique peut paraître être une solution adéquate à plusieurs échelles :

- A l'échelle locale, les progrès faits, ces dernières années, en matière de résolutions spatiale et spectrale permettent d'accéder à une information de haute qualité en limitant la collecte de données in situ.
- De plus, l'automatisation des méthodes d'extraction des informations permet une homogénéisation des résultats sur l'ensemble du réseau.
- Enfin, les sources de données disponibles sont nombreuses, variées et permettent de caractériser l'ensemble du territoire national (ex. : couverture des orthophotographies IGN).

Dans le cadre de la convention de recherche qui lie la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône - <http://www.graie.org/zabr/>) et l'agence de l'eau RMC, nous avons lancé une action de réflexion sur **l'utilisation de l'imagerie pour la caractérisation des cours d'eau du bassin du Rhône**. L'objectif est notamment de définir le type d'images le plus adapté à la question de la caractérisation physique à l'échelle du bassin.

Ce rapport comprend deux parties :

- Une **synthèse bibliographique** concernant les techniques d'imagerie pour la caractérisation des milieux fluviaux : différents types de capteurs/platformes, caractéristiques des images (résolution, coût...), exemples d'application...
- Une étude de faisabilité relative à **l'utilisation opérationnelle de l'imagerie pour la caractérisation physique des cours d'eau** : Comment choisir un couple capteurs / plateformes (avantages, inconvénients...) ? Quels types d'indicateurs peuvent être extraits des images ?

SOMMAIRE DU RAPPORT

| | |
|--|-----------|
| TECHNIQUES D'IMAGERIE : NOTIONS DE BASE ET EXEMPLES ILLUSTRÉS | 1 |
| Partie 1 - Quelques notions de télédétection | 2 |
| 1. Quelques principes | 2 |
| 2. Les caractéristiques d'une image | 6 |
| 3. Extraction d'informations à partir des images | 16 |
| 4. Vers de nouveaux enjeux techniques | 18 |
| Partie 2 - Quelques exemples d'applications de la télédétection dans l'étude des systèmes fluviaux | 19 |
| Partie 3 - Liste non exhaustive des capteurs et vecteurs employés en télédétection fluviale | 21 |
| QUESTIONS PRELIMINAIRES A L'UTILISATION DE L'IMAGERIE POUR LA CARACTERISATION PHYSIQUE A L'ECHELLE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE | 31 |
| Partie 1 - Quels couples capteur / plateforme choisir ? | 32 |
| Partie 2 - Images et SIG | 34 |
| Partie 3 - Quels indicateurs peuvent être extraits des images ? | 37 |
| 1. Construction d'indicateurs | 37 |
| 2. Exemples d'indicateurs | 41 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 43 |

SIGLES

| | |
|-------|---|
| ASC | Agence Spatiale Canadienne |
| ASTER | Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer |
| AVHRR | Advanced Very High Resolution Radiometer |
| AWIFS | Advanced Wide Field Sensor |
| C | Bande C: gamme de fréquence de 8 à 4GHz - longueurs d'onde de 3,75 à 7,5 cm |
| CNES | Centre National d'Etudes Spatiales (France) |
| ESA | Agence Spatiale Européenne |
| ETM | Enhance Thematic Mapper |
| H | Polarisation horizontale |
| HH | Emission et réception horizontale |
| HRG | Haute Résolution Géométrique |
| HRS | Haute Résolution Stéréoscopique |
| HRV | Haute Résolution Visible |
| HRVIR | Haute Résolution Visible et InfraRouge |
| HV | Emission horizontale et réception verticale |
| ISA | Indian Spatial Agency |
| JAXA | Japan Aerospace Exploration Agency |
| L | Bande L: gamme de fréquence de 2 à 1GHz - longueurs d'onde de 15 à 30 cm |
| LISS | Linear Imaging Self-Scanner |
| Mono. | Monospectral |
| MS | Multispectral |
| MSS | Multispectral Scanner |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration (USA) |
| Pan | Panchromatique |
| ROS | Radar à Ouverture Synthétique |
| SOP | Sensor optic |
| TM | Thematic Mapper |
| V | Polarisation verticale |
| VG | Végétation |
| VH | Emission verticale et réception horizontale |
| VV | Emission et réception verticale |
| XS | Multispectral |

TECHNIQUES D'IMAGERIE : NOTIONS DE BASE ET EXEMPLES ILLUSTRÉS

| | |
|---|-----------|
| Partie 1 - Quelques notions de télédétection | 2 |
| 1. Quelques principes | 2 |
| 2. Les caractéristiques d'une image | 6 |
| 3. Extraction d'informations à partir des images | 16 |
| 4. Vers de nouveaux enjeux techniques | 18 |
| Partie 2 - Quelques exemples d'applications de la télédétection dans l'étude des systèmes fluviaux | 19 |
| Partie 3 - Liste non exhaustive des capteurs et vecteurs employés en télédétection fluviale | 21 |

Partie 1 - Quelques notions de télédétection

Dans cette partie, les principes de la télédétection seront abordés, ainsi que les différentes caractéristiques afférentes aux images, et ce dans le but de souligner les éléments ayant une influence dans le choix des données à acquérir afin de caractériser l'état physique des cours d'eau.

1. QUELQUES PRINCIPES □

Selon le J.O du 11 décembre 1980, la **télédétection** correspond à « l'ensemble des **connaissances et techniques** utilisées pour déterminer des **caractéristiques physiques et biologiques d'objets** par des mesures effectuées **à distance, sans contact matériel avec ceux-ci** » (Thomas, 2007). Il s'agit d'une technique, où l'acquisition d'images permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre.

Le procédé, qui est ainsi utilisé, consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique, REM, émis ou réfléchi, par tout objet de la surface de la Terre (Figure 1).

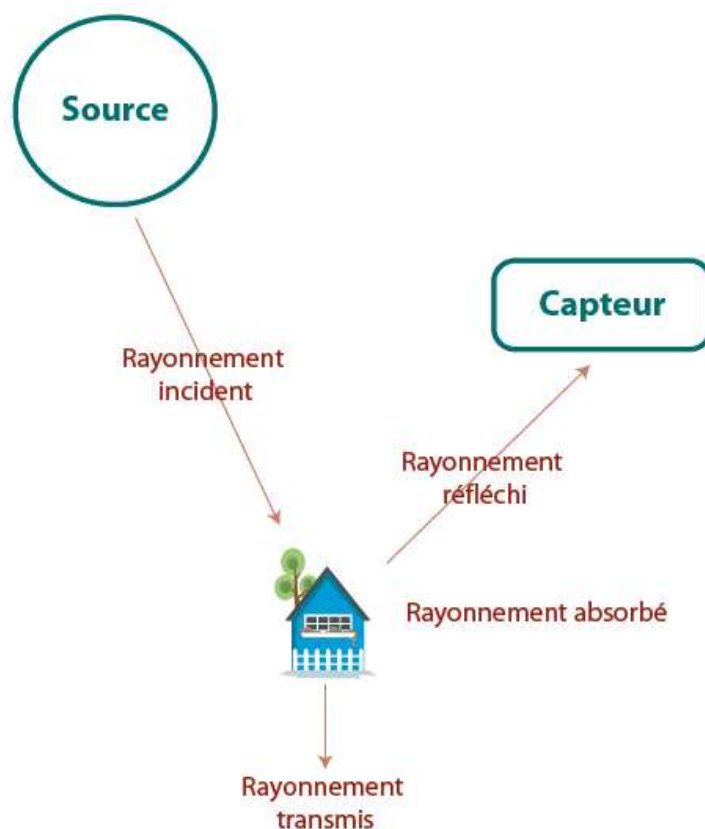


Figure 1 : Absorption, réflexion, transmission (d'après Bonn et Rochon, 1992)

La répartition des fréquences des rayonnements électromagnétiques des plus hautes aux plus basses fréquences est symbolisée par le **spectre électromagnétique** (Figure 2) (Chaponnière, 2004). Suivant le domaine spectral que l'on considère, le capteur enregistrera une énergie émise, réfléchie ou bien rétrodiffusée.

Télédétection passive

Les **capteurs passifs** détectent l'énergie naturelle réfléchiée par un objet dans la partie du spectre électromagnétique allant de l'ultra-violet à l'infrarouge (Figure 2) (Robin, 1995 ; Desjardins, 2000). En général, l'émetteur principal est le soleil (Girard & Girard, 2004). Les capteurs pouvant être utilisés sont des **appareils photographiques**, des **caméras** ou des **radiomètres** imageurs à systèmes à balayage optique ou mécanique ou à systèmes à barrette détecteurs (Desjardins, 2000).

Télédétection active

Les **capteurs actifs**, radars ou lasers, quant à eux illuminent les objets avec leur propre source de rayonnement, enregistrent « l'écho » et produisent ainsi des **images**. Cependant, il s'agit essentiellement d'une reconstitution de la forme des objets (2 dimensions, 3 dimensions), ils servent donc à produire des modèles numériques de terrain ou de surface. Notons également que ces capteurs peuvent être couplés avec des capteurs optiques (passifs) afin de restituer non seulement la forme mais également l'occupation du sol. Parmi ce type de capteurs, on trouve notamment :

- Le **radar** (Radio Detecting And Ranging) à synthèse d'ouverture (RSO)¹, qui est le système émetteur-récepteur le plus couramment employé. L'objet est donc illuminé par des rayonnements à micro-ondes et non pas par de la lumière. Ce type de capteur dispose d'une petite antenne qui transmet un signal relativement large, on le retrouve sur des satellites comme Radarsat ou ERS.
- Le **lidar** (Light Detection And Ranging) qui permet de faire, notamment, des relevés topographiques. Le résultat est composé de points spatialement référencés en trois dimensions, ce qui permet d'identifier des objets tel que le chenal, les ponts, la végétation (Figure 4). On l'installe sur des avions ou des hélicoptères (Desjardins, 2000). Ce qui le différencie du radar est le domaine spectral (visible, ultraviolet et infrarouge) dans lequel il travaille, le lidar utilise la lumière au lieu des ondes radio.

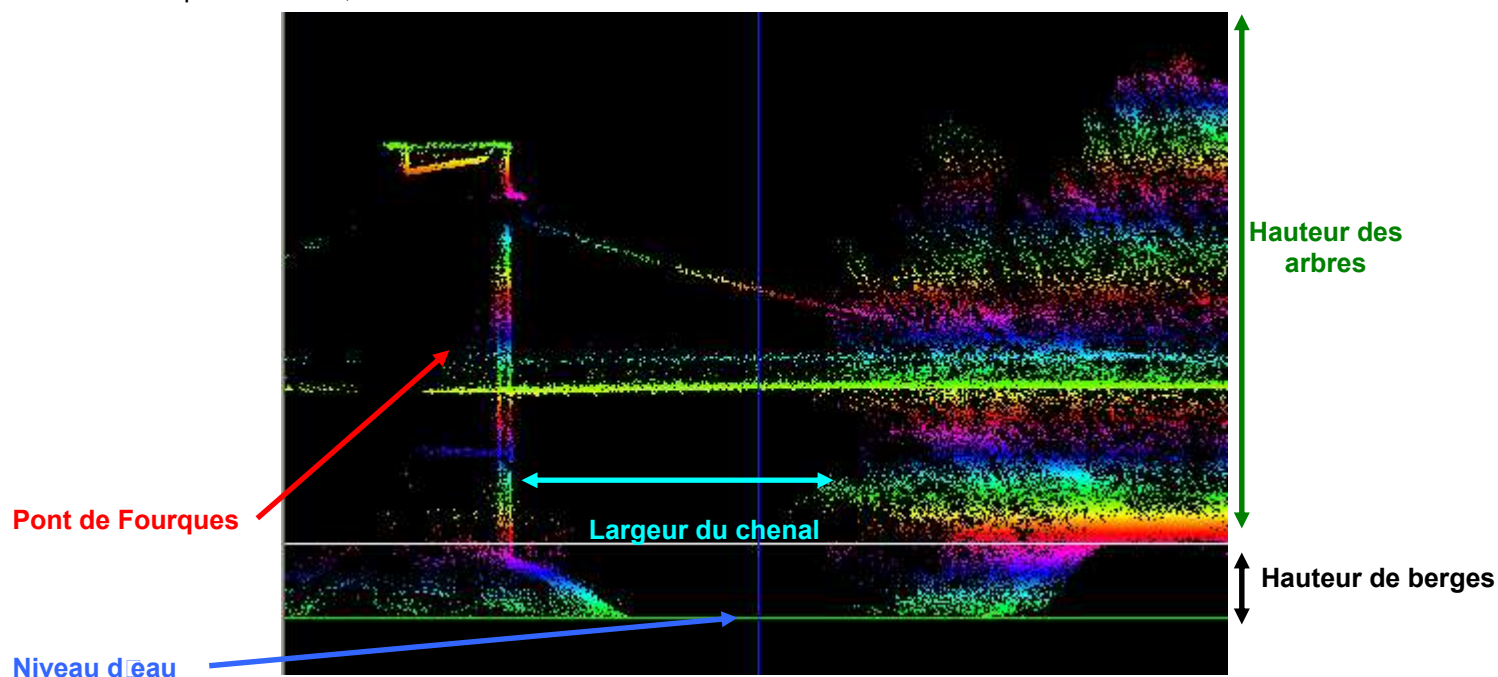


Figure 4 : Pont de Fourques - Petit Rhône, image lidar (Wiederkehr, 2006)

¹ En anglais, Synthetic Aperture Radar (SAR)

▪ Les **lasers** (Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation) ou les **fluoromètres**, sont d'autres systèmes utilisés en télédétection active (Girard & Girard, 2004).

Le point fort de la télédétection active réside dans la possibilité d'acquérir des données la nuit ainsi que sous couverture nuageuse. Ceci s'explique par le fait que les capteurs actifs produisent eux-mêmes leurs sources d'illumination.

1.2. Les vecteurs

Le dispositif permettant de placer un capteur dans l'espace et d'observer la cible à distance est le **vecteur**, appelé également **plateforme**. On en différencie plusieurs types en fonction de la distance qui les sépare du sol (Girard & Girard, 2004) (Figure 5). Par exemple :

- A quelques mètres du sol
 - Grues
 - mâts télescopiques
- Entre une dizaine de m et une centaine de km
 - Cerf-volant
 - Drone (20 à 300m)
 - ULM (100 à 3500m)
 - Ballons captifs troposphériques (300 à 3000m)
 - Hélicoptères, avion
- Entre une dizaine et une centaine de km
 - Ballons stratosphériques (30 à 40km)
- Entre 200 et 40 000km
 - Satellites habités ou non

Un même vecteur peut accueillir plusieurs types de capteurs. Le choix d'une image se fera donc souvent en fonction d'un **couple capteur / vecteur**.



Figure 5 : Représentation de différents vecteurs

2. LES CARACTERISTIQUES D'UNE IMAGE

Dans la mesure où il existe différents types d'images (Landsat, orthophotographie), il convient de s'attacher à comprendre les spécificités de chacun d'eux. Afin de savoir ce que chaque type peut apporter et de choisir entre les différentes combinaisons vecteur / capteur, il faut notamment prendre en compte trois caractéristiques : la **résolution spectrale**, la **résolution spatiale** et la **résolution temporelle**.

2.1. La résolution spectrale

La **résolution spectrale** correspond à l'aptitude du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes. Etant donné que les objets n'absorbent pas tous la même partie du rayonnement solaire, le spectre du rayonnement réfléchi sera **différent en fonction de chaque objet**. En effet, chaque objet réagit différemment au rayon incident et la **signature spectrale** d'un objet correspond à l'allure du spectre électromagnétique ainsi réfléchi (Figure 6). Elle permet de déterminer certaines propriétés des objets. Ainsi, certains capteurs produiront des images à partir desquelles il sera plus aisé de distinguer certains objets (eau, végétation). A chaque couleur correspond une longueur d'onde et par conséquent une fréquence précise. Elle est la seule information en télédétection qui est captée directement. Il s'agit d'un code d'identification qui est propre à chaque objet, comme « une empreinte digitale » (Desjardins, 2000). Elle dépend de différents paramètres comme l'élévation solaire, l'angle de visée et la précision spectrale et spatiale du capteur mais également de paramètres propres à l'objet comme la forme, la taille ou la texture. C'est grâce à la modification du signal en fonction de la nature de l'objet que son identification à distance est possible (Robin, 1995). Par exemple, pour la végétation les valeurs du rayonnement sont faibles dans le rouge mais élevées dans l'infrarouge alors que celles de l'eau sont à la fois faibles dans le rouge et dans l'infrarouge. Les signatures spectrales des objets observés couramment en bord de cours d'eau peuvent, notamment, se classer en **trois grandes catégories : l'eau, la végétation et les surfaces minérales** (Figure 6).

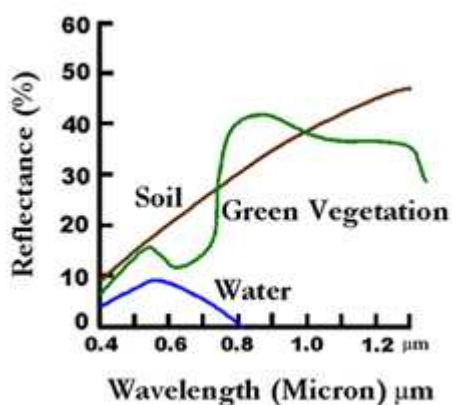


Figure 6 : Signature spectrale sur la surface de la Terre

En vert la végétation (bonne discrimination au-delà de 0,8µm), en bleu l'eau (bonne discrimination entre 0,5 et 0,6µm) et en marron le sol (discrimination croissante avec la longueur d'onde)

Source : <http://landsat.usgs.gov/>

La **signature spectrale** permet de distinguer trois types d'images (Figure 7 et 8) :

- Les **images panchromatiques**, que l'on obtient à partir de l'enregistrement dans le domaine du visible (0.4-0.7 μ m). Acquis dans **un seul canal**, les images sont **en noir et blanc**. La résolution spectrale étant plus faible, ce type d'image donne généralement une résolution spatiale importante.
- Les **images multispectrales**, qui s'obtiennent grâce à l'enregistrement simultané de trois à huit **bandes spectrales** mais qui ne sont pas obligatoirement adjacentes. Les ortho-photographies fournies par l'IGN sont des images multispectrales possédant trois canaux dans le domaine du visible (bleu, vert et rouge).
- Les **images hyperspectrales** s'obtiennent à partir de capteurs, dont la capacité d'enregistrement est de **plus de 200 bandes spectrales** dans la portion du visible, du proche InfraRouge et de l'IR moyen du spectre électromagnétique. Elles sont beaucoup **plus étroites** (quelques nm) et souvent contigües. Ce sont donc des images présentant une information détaillée avec une signature spectrale beaucoup plus fine. L'imagerie hyperspectrale, technique également appelée **spectroscopie imageante**, offre une identification plus précise des objets que celles reposant sur des capteurs à larges bandes.

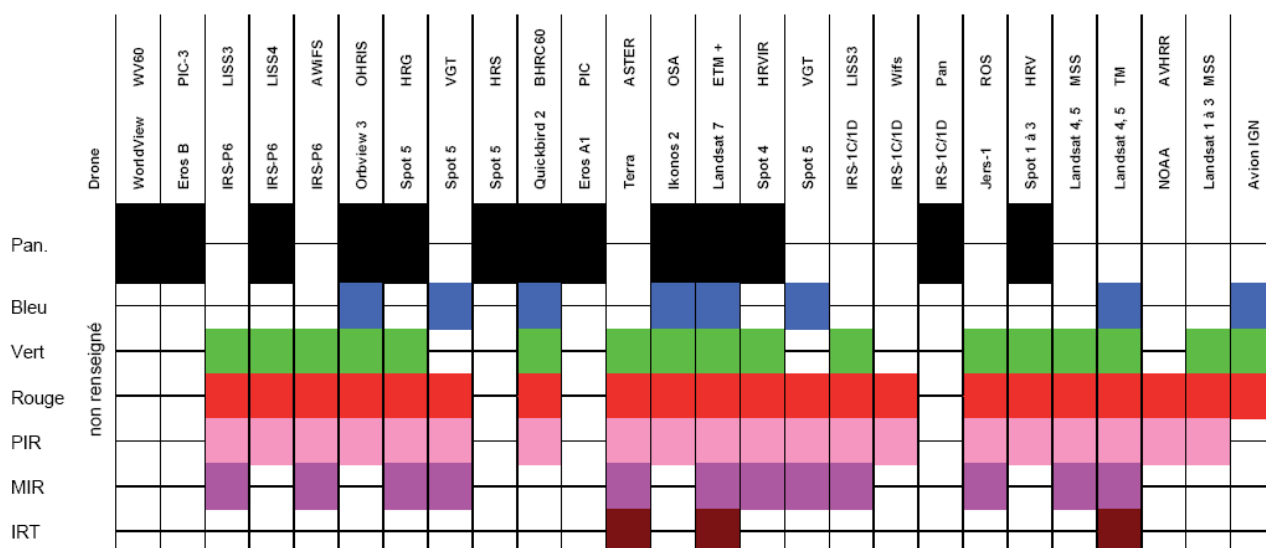


Figure 7 : Représentation des bandes spectrales de différents capteurs optiques

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

Il faut privilégier des capteurs permettant une bonne discrimination de chacun des **objets d'études (eau, végétation, sédiment)**. D'où l'importance de connaître les signatures spectrales de chacun des capteurs.

Les ondes des satellites radars (ENVISAT, ERS, ...) sont absorbées par l'eau. Il n'est pas possible d'en tirer une quelconque information sur la caractérisation du chenal en eau (ex. : profondeur, substrat, taux de matière en suspension). Il semble donc préférable de privilégier des **capteurs optiques** (télédétection passive) pour la suite de l'étude.

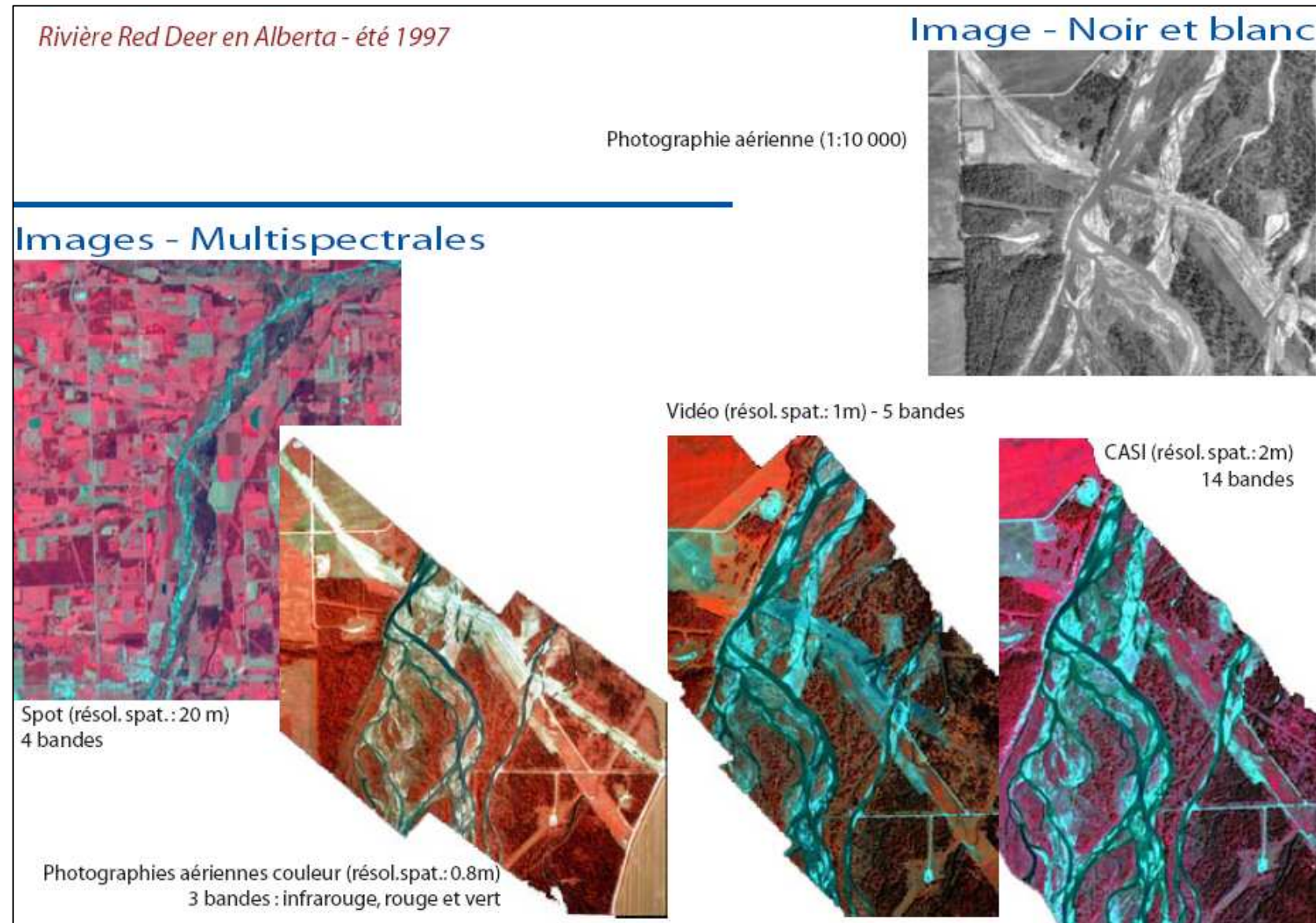


Figure 8 : Rivière Red Deer □ images de différentes résolutions spectrales (Source : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>)

2.2. La résolution spatiale

La **résolution spatiale** correspond à la **taille du plus petit objet perceptible dans une image** (Figure 9). Il s'agit du pixel, qui est la plus petite surface homogène constitutive d'une image numérique (Robin, 1995). Généralement la résolution spatiale est exprimée en m.

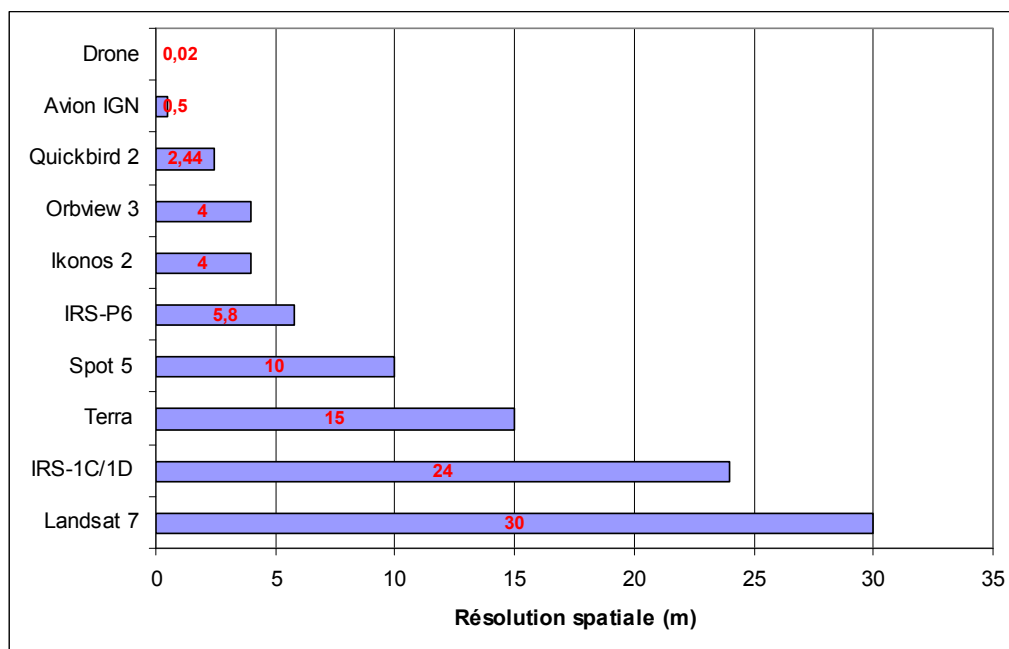


Figure 9 : Résolution spatiale de différents capteurs multispectraux dans le visible (résolution < à 30 m)

La lecture des différents travaux réalisés à ce sujet montre que la notion de haute ou très haute résolution reste encore assez floue. La haute résolution des années 1990 est à l'heure actuelle largement dépassée. Il n'est donc pas toujours évident de savoir à quelle échelle correspond le terme employé. Dans la suite de ce rapport, les termes de haute, très haute et extrêmement haute résolution seront définis comme ci-dessous, en se basant sur les travaux de Puissant (2003) et après modification (Tableau 1).

Tableau 1 : Niveau de résolution des différents capteurs (D'après Puissant A. (2003))

| | | Résolution spatiale (m) |
|-----|------------------------------|-------------------------|
| EHR | Extrêmement Haute Résolution | < 0.1 |
| THR | Très Haute Résolution | 0.1-5 |
| HR | Haute Résolution | 6-30 |
| MR | Moyenne Résolution | 31-100 |
| BR | Basse Résolution | >100 |

Le théorème de Nyquist-Shannon fixe que « *le pas minimal utilisable doit être inférieur ou égal à la demi-longueur du plus petit tronçon qui participe à la formation du contour du polygone* » (Bel Hadj Ali, 2001). Ce qui signifie que pour être détectable un **objet doit faire au minimum deux fois la taille du pixel**, soit du plus petit objet perceptible sur l'image. Par exemple, pour une image Ikonos 2 en panchromatique dont la résolution spatiale est de 1 m, les objets pouvant être discriminés doivent faire au minimum 2 m (soit 4 m² en surface). Le **seuil de détection de l'objet** est donc de **4 pixels minimum**. Le

seuil d'identification permettant de caractériser l'objet est quant à lui beaucoup plus élevé. Il faut prévoir 3 fois plus de pixels que pour la détection, soit un minimum de **12 pixels** (IFEN, 2005) voire 28 pixels selon certains auteurs (Robin, 1995).

La précision de la mesure, ou valeur de la résolution spatiale, (Figure 10) doit être adaptée à la thématique et à la taille des objets étudiés (Robin, 1995 ; Desjardins, 2000). Il s'agit d'un critère essentiel dans le choix du capteur. Par exemple, la détermination du lit majeur d'une rivière de taille moyenne (rang 4 à 6) peut généralement se faire à une échelle décamétrique, mais la mesure de la migration des formes fluviales nécessite une résolution métrique et l'identification de faciès granulométriques une résolution spatiale encore plus fine. De même, concernant la végétation, le niveau d'organisation biologique étudié est très sensible à la résolution spatiale des images. Pour une résolution faible, il est possible de faire la distinction entre des unités phytosociologiques (unités herbacée, pionnière, mature...) (Girel, 1986), alors qu'avec une résolution plus élevée, la discrimination entre espèce, au moins arborée, sera possible.

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

Suivant les objets étudiés et les indicateurs que l'on souhaite extraire, le degré de précision de l'information requis sera différent. Bien évidemment un niveau de résolution élevé, et tendant vers le **submétrique**, se traduit par une bonne qualité des mesures. Si l'on souhaite aborder tous les cours d'eau et pas seulement les plus grands, il convient donc d'orienter notre choix vers des capteurs de haute, très haute et extrêmement haute résolution, soit une **résolution toujours inférieure à 30m**.



Figure 10 : Saint Denis de la Réunion □ images de différentes résolutions spatiales (Source : www.bondy.ird.fr)

2.3. La résolution temporelle

La **résolution temporelle** se définit par la **fréquence d'acquisition** d'un vecteur d'une image au-dessus d'une zone donnée. C'est la faculté d'un capteur à fournir des informations espacées dans le temps permettant de rendre compte d'un changement géographique (Robin, 1995). Elle dépend notamment de la largeur de la fauchée (largeur de la scène) d'acquisition. La fréquence de passage de la plateforme au-dessus d'une zone donnée doit être adaptée à l'objectif de l'étude et notamment aux caractéristiques de changement de l'objet étudié. Certains capteurs, notamment les satellites, permettent d'obtenir plusieurs images par an et ainsi d'observer la variabilité intra-annuelle des objets alors que d'autres images, comme les images aériennes produites par l'IGN, ne présentent qu'une fréquence d'environ une fois tous les 5 ans. Il faut ajouter à la fréquence des passages, l'**ancienneté des acquisitions et les conditions d'archivage**. En effet, pour réaliser une analyse historique à moyen terme, les photographies aériennes permettent de remonter jusqu'aux années 1930-1940, dates des premières missions alors que les premières images satellitaires datent seulement des années 1970.

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

La **résolution temporelle** fait référence au laps de temps écoulé entre deux images. La répétitivité des images que l'on choisit dépend de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Certaines applications, telle que le suivi d'une crue, nécessitent des images prises avec une fréquence élevée. Dans le cas de la caractérisation d'un réseau hydrographique, la répétitivité des acquisitions a peut-être moins d'importance. Si l'objectif est la caractérisation **de l'état physique du réseau à un instant t** et sa **réévaluation périodique**, une résolution temporelle de 5 à 10 ans peut être suffisante.

2.4. D'autres critères à prendre en compte ?

Naturellement le **coût** des images est un critère non négligeable. Il dépend principalement de la zone à couvrir, et donc de la **taille de la scène** et de la **résolution spatiale** des images (Figure 11). Certaines images satellites (Spot, Landsat, ...) couvrent des surfaces de plusieurs milliers de km². Pour celles-ci le coût par km² est faible. Cependant, pour un gestionnaire qui travaille à l'échelle d'un tronçon de quelques kilomètres de long, l'acquisition d'une scène présentant bien souvent une surface minimale (ex. : 60 km par 60 km pour Ikonos 2) représente un coût élevé alors que celle-ci couvre des zones sans intérêt. De plus, ces images présentent généralement des résolutions spatiales relativement faibles. En revanche, à l'échelle du bassin versant, le rapport surface couverte / prix des images à large scène est un paramètre important pour déterminer l'image la mieux adaptée au terrain d'étude (Figure 12).

Le calcul du coût d'une image peut s'avérer compliqué dans la mesure où les scènes commercialisées présentent bien souvent des tailles minimales. Afin de comparer les différents couples vecteur / capteur, nous avons calculé le coût d'une image en fonction de la surface nécessaire à l'étude. c'est ainsi que, dans le domaine de la très haute résolution spatiale (< à 5 m), les photographies aériennes, commercialisées par l'IGN présentent l'un des coûts les plus faibles pour les tronçons de 1 x 1 km ou de 1 x 10 km (Figure 13 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** A et B), mais pour caractériser un tronçon plus

long (de 1 x 100 km) avec une résolution spatiale quasi-identique les images Ikonos ou Quickbird sont moins onéreuses (Figure 13 C).

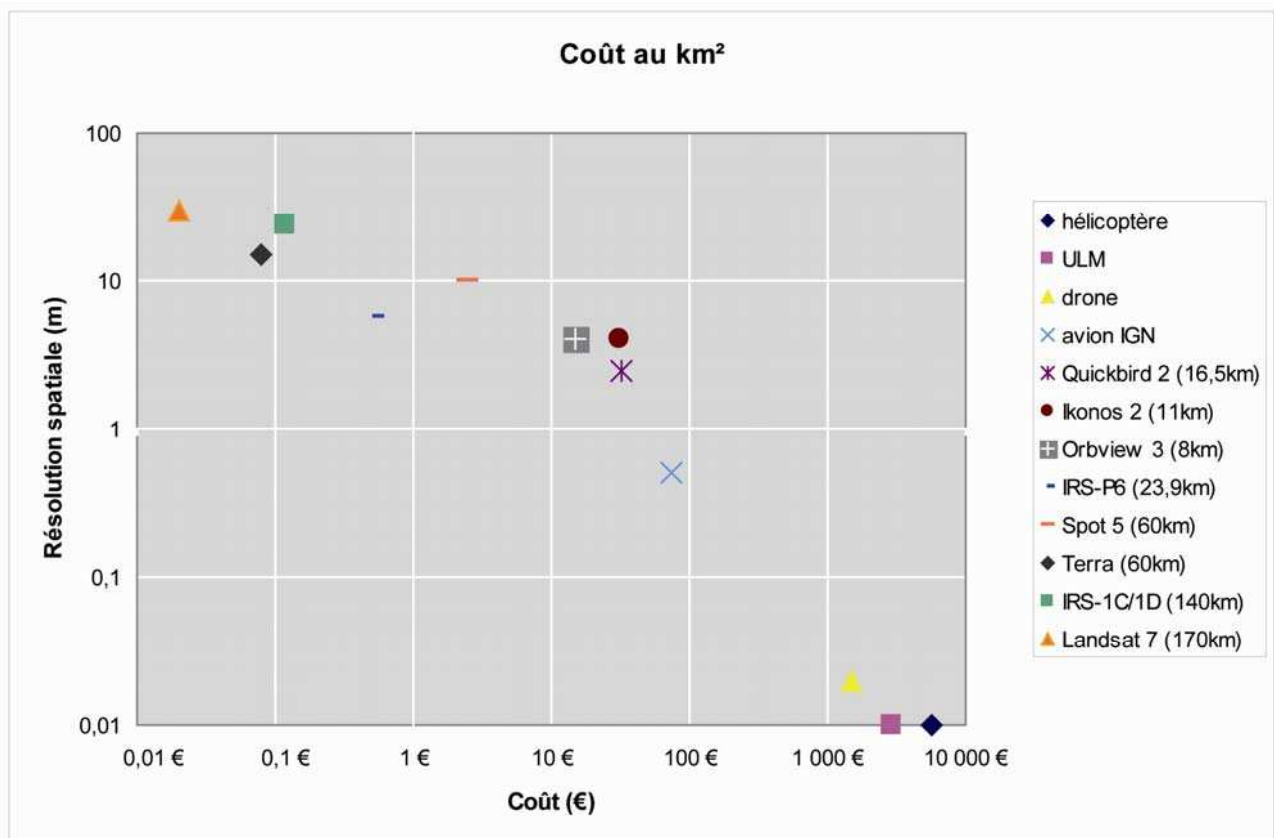


Figure 11 : Lien entre le coût d'une image par km² et sa résolution spatiale.

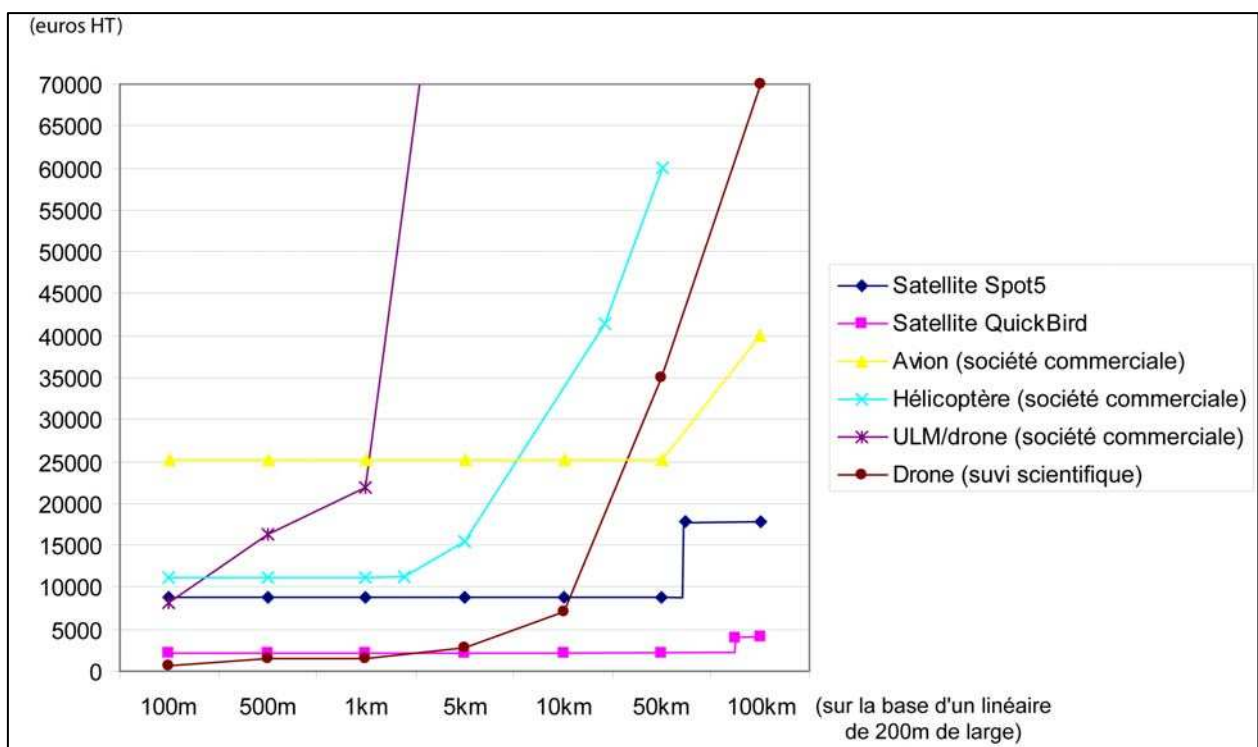


Figure 12 : Lien entre la taille du tronçon et le coût (d'après Lejot, 2008)

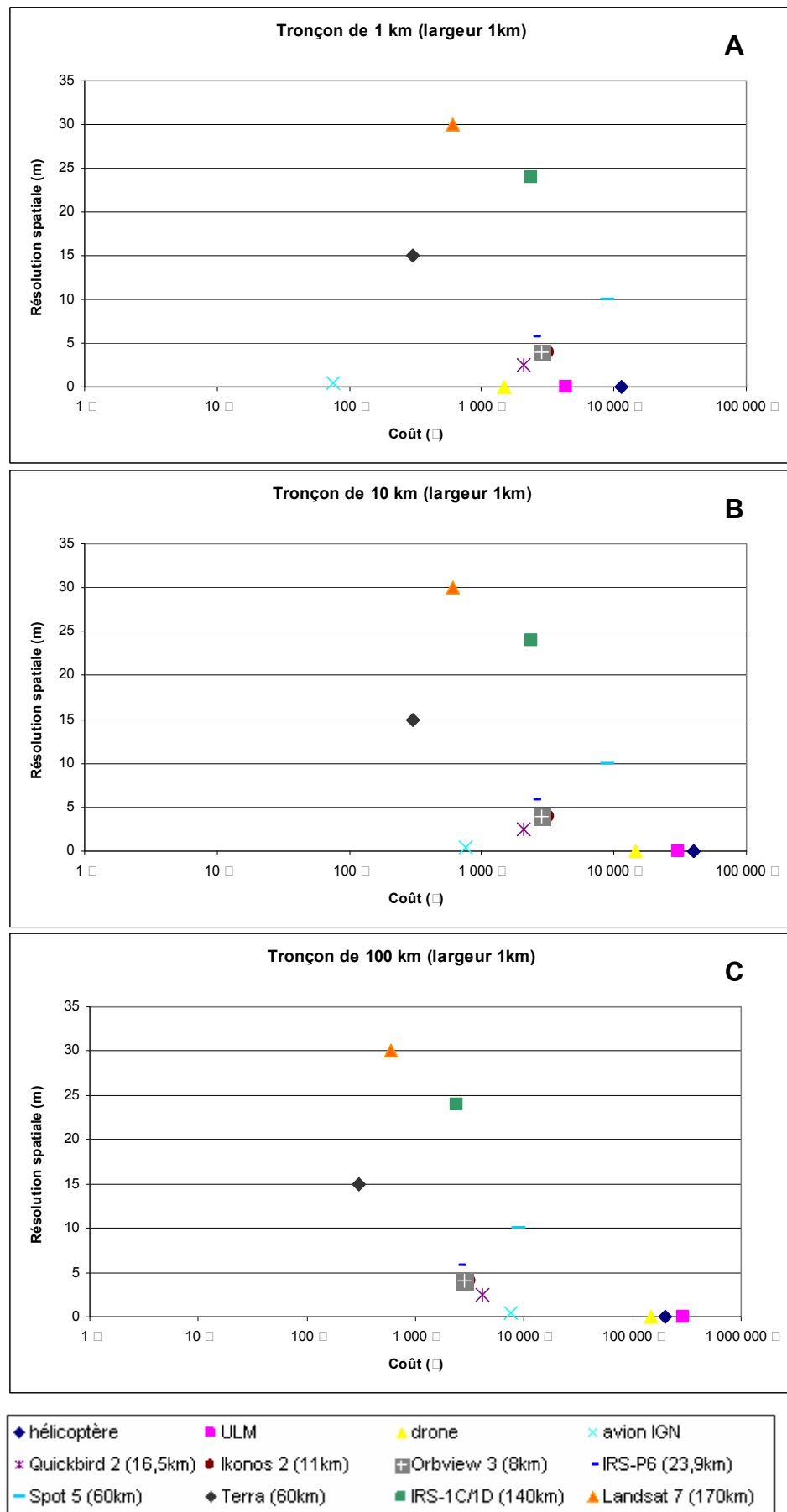


Figure 13 : Lien entre le coût d'une image d'une taille de 1 km* x1 km (A), de 1 km*x 10 km (B), de 1 km*x 100 km et sa résolution spatiale.

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

Le coût des images doit également être intégré comme critère de sélection. Deux paramètres vont influencer ce coût : la résolution spatiale désirée et l'échelle de travail. A l'échelle locale, les photographies aériennes représentent souvent un bon compromis entre résolution spatiale et coût mais il peut être judicieux, compte tenu des propriétés spectrales ou spatiales de certains supports, d'acquérir d'autres images dont le coût par km² reste faible sur de petites superficies. Par exemple, il est possible d'installer sur certains vecteurs, comme l'ULM, des capteurs à infrarouge. A l'échelle du bassin du Rhône, l'utilisation d'images satellites est plus abordable sur le plan financier mais ce choix implique également une résolution spatiale plus grossière.

3. EXTRACTION D'INFORMATIONS A PARTIR DES IMAGES

Les images brutes contiennent une certaine quantité d'information. L'extraction de ces informations peut se faire manuellement par digitalisation des objets visibles ou par extraction automatique à partir de certains logiciels d'analyse d'image.

Si la digitalisation manuelle assure un bon contrôle de l'extraction, elle est cependant soumise à un fort biais opérateur. De plus, l'extraction automatique des données offre l'avantage de pouvoir combiner un grand nombre d'informations qu'un photo-interprète n'est pas capable de synthétiser lui-même. L'extraction automatique améliore également significativement le temps de traitements des données (Robin, 1995).

Marcus et Fonstad (2007) distinguent essentiellement trois approches pour la caractérisation des rivières par télédétection : les analyses statistiques des données spectrales, les approches spatiales / texturales, la photogrammétrie :

1. Analyses statistiques des données spectrales

Les traitements statistiques par **classification** ou **régression** sont fréquemment utilisés pour la caractérisation des cours d'eau. Pour ces deux types de traitements, la calibration et la validation des relations doivent se faire par **comparaison avec des données de terrain** (Marcus et Fonstad 2007).

La **classification** permet l'identification de « **zones spectralement** » **similaires** sur une image. La signature spectrale des objets est extraite à partir de secteurs tests connus. Lorsqu'un lien est établi entre les objets et leur signature, les pixels de l'ensemble de l'image sont classés. Par exemple, Bisson et al (1982) se sont servis de la classification supervisée pour discriminer des unités aquatiques dont les signatures spectrales sont différentes. Cette méthode a également été utilisée dans la reconnaissance spatiale des formes et habitats intra-chenal par de nombreux auteurs (Legleiter et al, 2002 ; Marcus, 2002, Whited et al, 2002, Marcus et al, 2003 ; Gilvear et al 2004).

La **régression** est principalement utilisée pour extraire des « données ratio-niveau », comme la profondeur (Winterbottom et Gilvear 97 ; Whited et al 2002 ; Marcus et al 2003 ; Lorang et al 2005 ; Lejot et al 2007) la turbidité, ou encore la densité de végétation à partir d'un lien établi non plus entre la signature spectrale et la nature d'un objet mais entre sa signature spectrale et une variable le caractérisant mesurée in situ. □ .

2. Approches spatiale et texturale

Les photographies aériennes sont souvent utilisées pour cartographier les paramètres fluviaux car elles offrent une bonne résolution spatiale. Cependant, elles sont assez limitées sur le plan des informations spectrales. Pour améliorer les possibilités d'extraction de l'information, des techniques alternatives ont été développées en se basant sur les caractéristiques géométriques et texturales des objets et l'organisation spatiale des pixels (Marcus et Fonstad, 2007). En effet, la **structure spatiale** des pixels de l'image peut fournir des données quantitatives issues de traitement géostatistique (semi-variance) ou textural comme la taille des galets d'un banc émergé (Carbonneau et al 2003 ; 2004 ; 2005a ; 2006, Verdu & al, 2005). De même, les **mesures texturales** peuvent servir à la caractérisation des turbulences de surface, mais c'est un domaine encore peu exploité. Cette approche, dite « orientée-objet » a déjà été en partie testée sur les

corridors alluviaux par Perez Correa (2004), au moyen du logiciel eCognition de Definiens. Son application sur les ortho-photographies permet, après une phase d'apprentissage, une différenciation efficace des objets présents sur l'image.

3. Photogrammétrie

Il s'agit d'une **technique de mesures**, permettant d'obtenir la verticale d'un objet et de fait les fluctuations altimétriques d'une surface donnée. Si à partir d'une seule image, il est possible d'obtenir uniquement des informations en deux dimensions, l'utilisation d'images stéréoscopiques (avec un recouvrement des images entre-elles) permet de restituer la dimension **verticale** et donc la topographie d'un site. Grâce à des algorithmes de réfraction / correction, il est également possible d'appliquer cette méthode sous l'eau, c'est-à-dire de restituer la bathymétrie d'un chenal (Butler et al, 2002, Westaway et al, 2000, 2001, 2003). Pour obtenir ces grandeurs, diverses informations concernant le vecteur (altitude, géométrie relative par rapport au terrain) et le capteur (taille de la caméra et de l'image) sont nécessaires. Cette technique permet donc la caractérisation de la rivière dans un espace à trois dimensions (x, y, z) **sur de petites surfaces** (Lejot et al., 2007).

Notes pour des applications dans le domaine fluvial

A l'échelle d'un grand réseau hydrographique, il est nécessaire d'utiliser des procédures automatiques d'extraction des objets. Celles-ci sont essentiellement fondées sur des méthodes de classification pour les images satellites. Le développement récent d'approches orientées objet permet également d'utiliser l'approche spatiale et texturale sur les ortho-photographies et de palier partiellement leur défaut, la faible résolution spectrale.

4. VERS DE NOUVEAUX ENJEUX TECHNIQUES

Pendant longtemps, l'emploi de la télédétection n'était possible que sur de grands cours d'eau. Pour ceux de plus petites tailles, la résolution des images satellites était bien souvent insuffisante. Mais l'arrivée de nouveaux satellites de résolution submétrique, comme Ikonos, Quickbird 2, voire même WorldView, a changé la donne. Auparavant, seules les photographies aériennes offraient une résolution décimétrique. Maintenant il est possible avec ces nouveaux satellites de différencier les unités fluviales ou même d'étudier les surfaces exondées.

Des études en cours, sur la restauration physique et le suivi morphologique des rivières ont pour objectif, notamment de progresser en termes de précision et de fréquence d'observation. Pour atteindre ces objectifs, de nouveaux vecteurs sont testés, comme le drone ou l'hélicoptère. Leurs utilisations offrent une meilleure flexibilité d'utilisation, que ce soit en termes de surface couverte que de fréquence d'acquisition. Il est possible de faire des survols à dates rapprochées permettant ainsi le suivi d'événements épisodiques majeurs comme les crues. La résolution des capteurs embarqués sur ces « nouvelles » plateformes permet la mise en place de MNT centimétrique ou décimétrique.

Partie 2 - Quelques exemples d'applications de la télédétection dans l'étude des systèmes fluviaux

Le tableau 2 fait état de différents travaux ayant eu recours à de la télédétection.

Tableau 2 : Liste non-exhaustive des applications de la télédétection en géomorphologie fluviale

| Référence | Site d'études | Sujets d'études | Type d'images - échelle/taille pixel |
|---------------------------|--|---|---|
| bande active | | | |
| Nykanen et al., 1998 | Rivière Tanana (Alaska-USA) | morphologie d'une tresse | SAR |
| Lane et al., 2000 | <i>Non renseigné</i> | lit de rivière | Photographies numériques 1 :30000 |
| Winterbottom, 2000 | Rivière Tummel, Ecosse | érosion de berge et changement du chenal en plan | Photographies aériennes 1:10000 1:12000 |
| Igouzal et al., 2003 | Rivière Sebou, Maroc | morphologie d'une rivière à méandre | Photographies aériennes 1:20000 |
| Eykens, 2007 | Cours d'eau français, américain et italien | largeur moyenne, érosion relative | Photographies aériennes 1:20000 1:25000 |
| Slater, 2007 | Rivières en tresses - bassin RMC, France | surface en eau, migration latérale, unités physionomiques du corridor fluvial | Ortho-photographies |
| surfaces émergées | | | |
| Lane et al., 2003 | Waimakariri, Nouvelle-Zélande | bancs exondés de rivières en tresses | Photogrammétrie numérique → Modèle Numérique d'Élévation (résolution : 1 m) |
| Carbonneau, 2005 | <i>Non renseigné</i> | restitution des faciès granulométriques des bancs | Images numériques □ résolution 10 cm |
| Verdu et al., 2005 | Isabena River, Espagne. | | Images numériques 1 :1000 ; 1 :40 |
| Lejot, 2007 | Haut Rhône, France | végétation des bancs | Images drone |
| surfaces immergées | | | |
| Mertès et al., 1993 | Amazonie | concentration de MES | Landsat |
| Rainey et al., 2000 | Rivière Ribble, Angleterre | pourcentage d'argile, de limon et de sable | Airborne thematic mapper data, 2m pixel size |
| Brasington et al., 2003 | Ecosse | | Photographies numériques |
| Marcus et al., 2003 | Région de Yellowstone | bathymétrie d'eau peu profonde | Images hyperspectrales (128 bandes) □ résolution 1m |
| Westaway et al., 2003 | Waimakariri River | | Photogrammétrie numérique |

| | | | |
|--------------------------|--|--|---|
| Chaponnière, 2004 | Rivière de la Durance, France | bathymétrie | Images drone |
| Lejot, 2007 | Haut Rhône, France | bathymétrie, nature du fond | Images drone |
| surfaces inondées | | | |
| Muller, 1997 | Vallée de la Garonne, France | discrimination de la plaine inondable | Landsat TM (30m de résolution) |
| Miranda et al., 1998 | Amazonie | inondation d'une plaine inondable | Donnée SAR (JERS-1) |
| Bates and De Roo, 2000 | Rivière Meuse, Pays Bas | cartographie de l'expansion des crues/inondations plaines alluviales | SAR |
| Mariko et al., 2003 | Delta intérieur du Niger | surfaces inondées | NOAA/AVHRR |
| Raclot, 2003 | Rivière l'Hérault, France | niveaux d'eau en plaine inondée | Photographies aériennes 1:18000 |
| érosion/dépôt | | | |
| Gomez et al., 1995, 1997 | Rivière Mississippi, USA | impact d'une crue sur les dépôts sédimentaires | Landsat TM et photographie aérienne |
| Smith and Aldorf, 1998 | Rivière Ob, Sibérie | érosion et dépôt en plaine inondable | SAR |
| végétation | | | |
| Marston et al., 1995 | Rivière de l'Ain, France | végétation riparienne | Photographies aériennes (1945-1991) |
| Muller, 1997 | Garonne | différenciation des clones de peuplier | Images SPOT |
| Bryant and Gilvear, 1999 | Rivière Tummel, Ecosse | changement de la végétation riveraine | Imagerie multispectrale aéroportée (1m de résolution) |
| Dufour, 2005 | Rivière de l'Arve et de l'Ain | évolution paysagère | Photographies aériennes 1:15000 1:25000 1:30000 |
| Lassette et al. 2007 | Rivière de l'Ain, France | bois morts | Photographies hélicoptères obliques et aériennes verticales |
| occupation du sol | | | |
| Perez Correa, 2004 | Rivières la Lez et l'Ain, France | occupation du sol (végétation, culture, □) | Spot, orthophotos (0,5m), photographies aériennes (2m) |
| Slater, 2007 | Rivières en tresses - bassin RMC, France | occupation du sol (endiguements, installation humaines) | Ortho-photographies |
| autres | | | |
| Puestow et al., 2001 | Non renseigné | caractérisation des habitats aquatiques | Image multispectrale CASI |

Partie 3 - Liste non exhaustive des capteurs et vecteurs employés en télédétection fluviale

Résolution de différents couples capteur / plateformes

| | | Résolution temporelle | Résolution spectrale | | | | | | | | | Résolution spatiale | | | | |
|------------------------|--------|-----------------------------------|----------------------|--------------|-----------------|---|---|--------------------|-----|-----|---|---------------------|--------|-------|---------|-------|
| | | Fréquence de passage | Réseau | Pan ou mono. | Optique (en µm) | | | XS (multispectral) | | | | EHR | THR | HR | MR | BR |
| | | | | | B | V | R | PIR | MIR | IRT | | <0,1m | 0,1-5m | 6-30m | 31-100m | >100m |
| Drone | | - | | X | | | X | | | | | X | | | | |
| Helicoptère | | - | non renseigné | | | | | | | | | X | | | | |
| ULM | | - | | | | | X | | X | | | X | | | | |
| Avion IGN | | tous les 5 ans | | | | | X | | | | | | X | | | |
| WorldView | WV60 | non renseigné | | X | | | | | | | | | X | | | |
| Eros B | PIC-3 | non renseigné | | X | | | | | | | | | X | | | |
| IRS-P6 (Resourcesat 1) | LISS3 | 24 jours (Pan et MX 5 à 24 jours) | | | | | X | X | X | X | | | | X | | |
| | LISS4 | | | mono. | | | X | X | X | | | | | X | | |
| | AWIFS | | | | | | X | X | X | X | | | | | X | |
| Orbview 3 | OHRIS | 3 jours | | X | | | X | | X | | | | X | | | |
| Spot 5 | HRG | 3 à 26 jours | | X | | | X | X | X | X | | | X | X | | |
| | VGT | 1 fois/jour | | | | X | | X | X | X | | | | | | X |
| | HR5 | 3 à 26 jours | | X | | | | | | | | | | X | | |
| Envisat | ROS | 35 | X | | | | | | | | | | | X | X | X |
| Quickbird 2 | BHRC60 | 1 à 3,5 jours | | X | | | X | | X | | | | X | | | |
| Eros A1 | PIC | 1,8 à 4 jours | | X | | | | | | | | | X | | | |
| Terra | ASTER | 16 jours | | | | | X | X | X | X | X | | | X | X | |
| Ikonos 2 | OSA | 3 jours à 1m; 1,5 jours à 1,5m | | X | | | X | | X | | | | X | | | |
| Landsat 7 | ETM + | 16 jours | | X | | | X | | X | X | X | | | X | X | X |
| Spot 4 | HRVIR | 3 à 26 jours | | X | | | X | X | X | X | | | | X | | |
| | VGT | 1 fois/jour | | | | X | | X | X | X | | | | | | X |
| Radarsat 1, 2 | ROS | 1: 16 jours; 2: 24 jours | X | | | | | | | | | | | X | X | |
| IRS-1C/1D | LISS3 | 24 jours (Pan 5 à 24 jours) | | | | | X | X | X | X | | | | X | | |
| | Wife | | | | | | X | X | | | | | | | | X |
| | Pan | | | X | | | | | | | | | | X | | |
| Jers-1 | ROS | 44 jours | X | | | | X | X | X | X | | | | X | | |
| ERS 1, 2 | ROS | 35 | X | | | | | | | | | | | X | | |
| Spot 1 à 3 | HRV | 3 à 26 jours | | X | | | X | X | X | | | | | X | | |
| Landsat 4, 5 | MSS | 16 jours | | | | | X | X | X | X | | | | | X | |
| | TM | | | | | | X | | X | X | | | | X | | X |
| NOAA | AVHRR | 2fois/jour | | | | | X | X | | | | | | | | X |
| Landsat 1 à 3 | MSS | 18 jours | | | | | X | X | X | | | | | | X | |

EHR: Extrême Haute Résolution; THR: Très Haute Résolution; HR: Haute Résolution; MR: Moyenne Résolution; BR: Basse Résolution

Satellites
Caractéristiques générales

| | Plateforme | | | | | | | Capteur | | |
|-----------------------------------|------------|-------------------|------------|-----------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------|---------------------------|--|
| | Pays | Date de lancement | Fin de vie | Altitude | Inclinaison | Période de révolution | Orbite | Nom | Type | Stéréoscopie |
| WorldView | Etats-Unis | sept-07 | - | 496,00 km | <i>non renseigné</i> | 94,60 min | Héliosynchrone | WV60 | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> |
| Eros B | Israël | avr-06 | - | 500,00 km | 97,70° | 94,70 min | Héliosynchrone | PIC-3 | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> |
| IRS-P6 (Resourcesat 1) | Inde | oct-03 | - | 817,00 km | 98,70° | 101,35 min | Héliosynchrone polaire | LISS3 | Radiomètre à balayage | oui (+/- 26° d'inclinaison) |
| | | | | | | | | LISS4 | | oui (+/- 26° d'inclinaison) |
| | | | | | | | | AWIFS | | - |
| Orbview 3 | Etats-Unis | juin-03 | - | 470,00 km | 97,30° | 92,50 min | Héliosynchrone | OHRIS | <i>non renseigné</i> | - |
| Spot 5 | France | mai-02 | - | 822,00 km | 98,70° | 101,40 min | Héliosynchrone | HRG | Radiomètre à barrettes | oui (2 modes: +/- 27° d'inclinaison en visée oblique et visée avant arrière) |
| | | | | | | | | VGT | | - |
| | | | | | | | | HRS | | oui |
| Envisat | Europe | mars-02 | - | 800,00 km | 98,60° | 100,60 min | Héliosynchrone | ROS | Capteur actif à barrettes | - |
| Quickbird 2 | Etats-Unis | oct-01 | - | 450,00 km | 97,20° | 93,50 min | Héliosynchrone | BHRC60 | Radiomètre à barrettes | oui |
| Eros A1 | Israël | déc-00 | - | 480,00 km | 97,30° | 94,60 min | Héliosynchrone polaire | PIC | Radiomètre à barrettes | oui |
| Terra | Etats-Unis | déc-99 | - | 705,00 km | 98,20° | 98,88 min | Héliosynchrone polaire | ASTER | Radiomètres à barrettes | oui (bandes 3 et 3B) |
| Ikonos 2 | Etats-Unis | sept-99 | - | 681,00 km | 98,10° | 98,00 min | Héliosynchrone polaire | OSA | Radiomètre à barrettes | oui (+/- 26° d'inclinaison) |

Satellites
Caractéristiques générales

| | Plateforme | | | | | | | Capteur | | |
|----------------------|------------|------------------------------------|---------------------------|-----------|-------------|-----------------------|------------------------|---------|---------------------------|---|
| | Pays | Date de lancement | Fin de vie | Altitude | Inclinaison | Période de révolution | Orbite | Nom | Type | Stéreo-scopie |
| Landsat 7 | Etats-Unis | avr-99 | - | 705,00 km | 98,20° | 99,00 min | Héliosynchrone polaire | ETM + | Radiomètre à balayage | - |
| Spot 4 | France | mars-98 | - | 822,00 km | 98,70° | 101,40 min | Héliosynchrone | HRVIR | Radiomètre à barrettes | oui (+/- 27° d'inclinaison) |
| | | | | | | | | VGT | | - |
| Radarsat 1, 2 | Canada | 1: 1995; 2: déc-2007 | - | 798,00 km | 98,60° | 100,70 min | Héliosynchrone polaire | ROS | Capteur actif à barrettes | oui (visée à droite pour 1 et à gauche et à gauche pour 1 et 2) |
| IRS-1C/IRS-1D | Inde | IRS-1C: 1995; IRS-D: 1997 | - | 817,00 km | 98,69° | 101,20 min | Héliosynchrone polaire | LISS3 | Radiomètre à balayage | - |
| | | | | | | | | Wifs | non renseigné | non renseigné |
| | | | | | | | | Pan | non renseigné | - |
| Jers-1 | Japon | févr-92 | oct-98 | 568,00 km | 97,70° | 96,00 min | Héliosynchrone polaire | ROS | Capteur actif à barrettes | oui (bandes 3 et 4) |
| ERS 1, 2 | Europe | 1: 1991; 2: 1995 | 1: mars 2000 | 785,00 km | 98,52° | 100,00 min | Héliosynchrone polaire | ROS | Capteur actif à barrettes | - |
| Spot 1 à 3 | France | 1: févr-86; 2: janv-90; 3: sept-93 | 1: 2003; 3: 1996 | 822,00 km | 98,70° | 101,40 min | Héliosynchrone | HRV | Radiomètre à barrettes | oui (+/- 30° d'inclinaison) |
| Landsat 4, 5 | Etats-Unis | 4: 1982; 5: 1986 | 4: 1986; 5: 1995 (MSS) | 705,00 km | 98,20° | 99,00 min | Héliosynchrone polaire | MSS | Radiomètre à balayage | - |
| | | | | | | | | TM | Radiomètre à balayage | - |
| NOAA | Etats-Unis | depuis 1979 | non renseigné | 833,00 km | 98,90° | 102,00 min | Héliosynchrone polaire | AVHRR | Radiomètre à balayage | - |
| Landsat 1 à 3 | Etats-Unis | 1: 1972; 2: 1975; 3: 1978 | 1: 1978; 2: 1982; 3: 1983 | 917,00 km | 99,20° | 103,00 min | Héliosynchrone polaire | MSS | Radiomètre à balayage | - |

Satellites - optique
Résolution spectrale

| | | Pan ou mono. (en µm) | Multispectral (en µm) | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--------|-------------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | Visible | | | InfraRouge | | | | | | | | | | | | |
| | | | B | V | R | PIR | | MIR | | | | | | TIR | | | | |
| WorldView | WV60 | 0,40-0,90 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Eros B | PIC-3 | 0,50-0,90 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| IRS-P6 (Resourcesat 1) | LISS3 | | | 1 0,52-0,59 | 2 0,62-0,68 | 3 0,77-0,86 | | 4 1,55-1,70 | | | | | | | | | | |
| | LISS4 | 0,62-0,68 (mono.) | | 1 0,52-0,59 | 2 0,62-0,68 | 3 0,77-0,86 | | | | | | | | | | | | |
| | AWiFS | | | 1 0,52-0,59 | 2 0,62-0,68 | 3 0,77-0,86 | | 4 1,55-1,70 | | | | | | | | | | |
| Orbview 3 | OHRIS | 0,45-0,90 | 1 0,45-0,52 | 2 0,52-0,60 | 3 0,62-0,69 | 4 0,76-0,90 | | | | | | | | | | | | |
| Spot 5 | HRG | 0,48-0,71 | | 1 0,50-0,59 | 2 0,61-0,68 | 3 0,78-0,89 | | 4 1,58-1,75 | | | | | | | | | | |
| | VGT | | 0 0,45-0,52 | | 2 0,61-0,68 | 3 0,78-0,89 | | 4 1,58-1,75 | | | | | | | | | | |
| | HRS | 0,49-0,69 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Quickbird 2 | BHRC60 | 0,45-0,90 | 1 0,45-0,52 | 2 0,52-0,60 | 3 0,63-0,69 | 4 0,76-0,90 | | | | | | | | | | | | |
| Eros A1 | PIC | 0,50-0,90 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Terra | ASTER | | | 1 0,52-0,60 | 2 0,63-0,69 | 3 0,78-0,86 | 3B 0,78-0,90 | 4 1,60-1,70 | 5 2,145-2,185 | 6 2,185-2,225 | 7 2,235-2,285 | 8 2,295-2,365 | 9 2,36-2,43 | 10 8,125-8,475 | 11 8,475-8,825 | 12 8,925-9,275 | 13 10,25-10,95 | 14 10,95-11,65 |
| Ikonos 2 | OSA | 0,45-0,90 | 1 0,45-0,52 | 2 0,52-0,60 | 3 0,63-0,69 | 4 0,76-0,85 | | | | | | | | | | | | |

Satellites - optique
Résolution spatiale

| | | Panchromatique | Multispectral |
|------------------------|--------|----------------|------------------------------------|
| WorldView | WV60 | 0,5 | |
| Eros B | PIC-3 | 0,7 | |
| IRS-P6 (Resourcesat 1) | LISS3 | | 23,5 |
| | LISS4 | 5,8 | 5,8 |
| | AWiFS | | 56 |
| Orbview 3 | OHRIS | 1 | 4 |
| Spot 5 | HRG | 2,5-5 | B1/B2/B3:10 - B4:20 |
| | VGT | | 1000 |
| | HRS | 10 | |
| Quickbird 2 | BHRC60 | 0,61 | 2,44 |
| Eros A1 | PIC | 1,8 | |
| Terra | ASTER | | 1,2,3B: 15; 4 à 9: 30; 10 à 14: 90 |
| Ikonos 2 | OSA | 1 | 4 |
| Landsat 7 | ETM + | 15 | 30; B6: 120 |
| Spot 4 | HRVIR | 10 | 20 |
| | VGT | | 1000 |
| | LISS3 | | 24 |
| IRS-1C/1D | Wifs | | 188 |
| | Pan | 5,8 | |
| Jers-1 | ROS | | 18 |
| Spot 1 à 3 | HRV | 10 | 20 |
| Landsat 4, 5 | MSS | | 80 |
| | TM | | 30; B6: 120 |
| NOAA | AVHRR | | 1100 |
| Landsat 1 à 3 | MSS | | 80 |

Satellites - radar
Résolutions spectrale et spatiale

| | | Résolution spatiale (m) | Résolution spectrale | | |
|---------------|-----|------------------------------------|----------------------|---------------|-----------------------------|
| Envisat | ROS | Variable: 30 à 150 | 5,300 GHz | C 5,66 cm | HH HV VH et VV |
| Radarsat 1, 2 | ROS | Variable: 10; 25; 50 et 3 pour n°2 | 5,300 GHz | C 5,66 cm | 1 et 2: HH; 2: HV, VH et VV |
| Jers-1 | ROS | 18 | 1,275 GHz | L 23,00 cm | HH |
| ERS-1, 2 | ROS | 30 | 5,300 GHz | C 5,66 cm | VV |

Photographies aériennes
et cartesPhotographies aériennes

| | | Date | Altitude | Capteurs | Résolution spatiale (m) | Résolution temporelle (jour/an) | Domaine spectrale | Taille de la scène (km²) | Prix d'une scène (euro) | Mode stéréoscopique |
|-----------------------------------|--------|--|------------------------------------|--|--|---|---------------------------|---------------------------|--|----------------------|
| Drone | - | - | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | 0,2 | 180 | Visible et panchromatique | 0,17 | 500 | <i>non renseigné</i> |
| Hélicoptère | - | - | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | 0,1 | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | 2 km * 500 m | 5700 (HT) | <i>non renseigné</i> |
| ULM | - | - | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | 0,05 et 0,10 | <i>non renseigné</i> | Visible et PIR | 0,75 | Visible : à partir de 2175 et PIR : à partir de 1087,5 | <i>non renseigné</i> |
| Avion (IGN) - ortho-photographies | France | depuis 1921 (service géographique de l'armée) | 8,8 km (en pratique mais variable) | argentique (f:152mm) | 0,5 (1:2000 et 1:65000 selon les séries) | Variable avant 2000 / Depuis 2000, tous les 5 ans (du 15/05 au 15/09) | N et B jusqu'en 1960 | Support papier: variable | 75 | oui |
| | | 1939 à 1952 pour la 1ère couverture complète du territoire | | postérieur à 2000 CCD Kodak (f: 152mm) | | | Couleur | Ortho photo: 1*1 la dalle | | |

Images numériques géoréférencées

| | Résolution au sol (m) | Dimension minimale | Prix (euro) | Remarques |
|----------------|-----------------------|--------------------|----------------|--|
| Cartes Scan 25 | 2,5 | 10km*10km | 150 (la dalle) | Produit raster issu des fichiers numériques des cartes IGN à l'échelle du 1:25 000 |
| | | France entière | 182500 | |

Tarifs de différents capteurs

| | | | Données | | | Données archivées | | |
|-------------|---------|----------------|--|---------------------------|------------------------------|--|---------------------------|------------------------------|
| | | | Surface minimum d'achat (km ²) | Prix (€/km ²) | Prix par image commandée (€) | Surface minimum d'achat (km ²) | Prix (€/km ²) | Prix par image commandée (€) |
| Drone | | | <i>non renseigné</i> | 1 470,59 | 0,00 | | | |
| Eros B | PIC-3 | Pan | 49 | 21,00 | 1 029,00 | 49 | 14,70 | 720,30 |
| IRS-P6 | LISS4 | Pan ou XS | 4 900 | 0,51 | 2 500,00 | | 0,00 | 0,00 |
| | | Pan | 192 | 14,70 | 2 822,40 | 64 | 7,35 | 470,40 |
| Orbview 3 | OHRIS | Pan (Stereo) | 192 | 49,98 | 9 596,16 | 64 | 24,99 | 1 599,36 |
| | | XS | 192 | 14,70 | 2 822,40 | 64 | 7,35 | 470,40 |
| Spot 5 | HRG | Pan | 3 600 | 1,72 | 6 200,00 | 3 600 | 1,50 | 5 400,00 |
| | | | 1 600 | 3,03 | 4 850,00 | 1 600 | 2,53 | 4 050,00 |
| | | | 900 | 3,89 | 3 500,00 | 900 | 3,00 | 2 700,00 |
| | | | 400 | 7,10 | 2 840,00 | 400 | 5,10 | 2 040,00 |
| | | Couleurs | 3 600 | 2,47 | 8 900,00 | 3 600 | 2,25 | 8 100,00 |
| Quickbird 2 | BHRC 60 | Pan ou XS | 64 | 30,87 | 1 975,68 | 25 | 23,52 | 588,00 |
| | | 3 ou 4 bandes | 64 | 32,34 | 2 069,76 | 25 | 24,99 | 624,75 |
| | | Bundle (Pan et | 64 | 36,75 | 2 352,00 | 25 | 29,40 | 735,00 |
| Eros A1 | PIC | Pan | 196 | 11,25 | 2 205,00 | 196 | 6,83 | 1 337,70 |
| Terra | ASTER | | 3 600 | 0,08 | 300,00 | 3 600 | 0,02 | 75,00 |
| Ikonos 2 | OSA | Pan ou XS | 100 | 29,40 | 2 940,00 | 49 | 23,52 | 1 152,48 |
| | | Couleurs | 100 | 31,61 | 3 160,50 | 49 | 24,99 | 1 224,51 |
| | | Bundle (Pan et | 100 | 33,81 | 3 381,00 | 49 | 26,46 | 1 296,54 |
| Landsat 7 | ETM+ | | 31 622 | 0,02 | 475,00 | | | |
| IRS-1C/1D | Pan | Pan | 4 900 | 0,46 | 2 250,00 | | | |
| | | | 529 | 1,42 | 750,00 | | | |
| | LISS3 | XS | 19 600 | 0,12 | 2 400,00 | | | |
| | | | 4 900 | 0,31 | 1 500,00 | | | |

Satellites Accès aux données

| | Date | Page web | Choix de la donnée |
|-------------|----------------------|--|---|
| Eros B | <i>non renseigné</i> | http://www.scanex.com/en/data/default.asp?submenu=eros&id=delivery | <i>non renseigné</i> |
| IRS-P6 | mai-07 | www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf | Standard data products |
| Orbview 3 | janv.-06 | www.geoeye.com/whitepapers_pdfs/OV-3_Catalog.pdf | Obview Basic Enhanced |
| Spot 5 | juil.-06 | www.spotimage.fr/automne_modules_files/standard/public/p335_ba582c667a21f3b7d1108ad9773629fdListe_Prix_2007Fr.pdf | Spot scene - image standard |
| Quickbird 2 | mai-07 | www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf | Image library / Standard tasking |
| Eros A1 | <i>non renseigné</i> | http://www.scanex.com/en/data/default.asp?submenu=eros&id=delivery | <i>non renseigné</i> |
| Terra | mai-07 | www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf | New tasking Package - Archive Level IA, IB et 2 |
| Ikonos 2 | août-05 | http://www.euspaceimaging.com/sime.asp?page=products | Georectified products |
| Landsat 7 | mai-07 | www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf | Basic Set - standard |
| IRS-1C/1D | mai-07 | www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf | Standard data products |

Satellites
Divers renseignements

| | | Taille de la fauchée (km) | Programmable | Initiateur | Adresse internet initiateur | Adresse internet fournisseur principal |
|---------------------------|--------|---------------------------|----------------------|----------------------|---|--|
| WorldView | WV60 | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | www.digitalglobe.com |
| Eros B | PIC-3 | 16*16 | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | |
| IRS-P6 (Resourcesat 1) | LISS3 | 140 | <i>non renseigné</i> | ISA | www.isro.gov.in | www.eurimage.com |
| | LISS4 | 70 (mono.) 23,9 (XS) | | | | |
| | AWIFS | 740 | | | | |
| Orbview 3 | OHRIS | 8*8 | <i>non renseigné</i> | GEOEYE | www.geoeeye.com | www.orbimage.com |
| Spot 5 | HRG | 60*60 | oui | CNES | www.cnes.fr | www.spotimage.fr |
| | VGT | 2000*2000 | | | | |
| | HRS | 60*120 | | | | |
| Envisat | ROS | <i>non renseigné</i> | oui | ESA | www.esa.int/esaCP/France.html | www.spotimage.fr |
| Quickbird 2 | BHRC60 | 16,5*16,5 | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | www.eurimage.com |
| Eros A1 | PIC | 12,5*12,5 | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | www.jpsts.com |
| Terra | ASTER | 60 | <i>non renseigné</i> | NASA et JAXA | www.nasa.gov / www.jaxa.jp | www.eurimage.com |
| Ikonos 2 | OSA | 11*11 | <i>non renseigné</i> | GEOEYE | www.geoeeye.com | www.euspaceimaging.com |
| Landsat 7 | ETM + | 185*170 | <i>non renseigné</i> | NASA et EOSAT | www.nasa.gov | www.eurimage.com |
| Spot 4 | HRVIR | 60*60 | oui | CNES | www.cnes.fr | www.spotimage.fr |
| | VGT | 2000*2000 | | | | |
| Radarsat 1, 2 | ROS | 45 à 500 | oui | ASC | www.space.gc.ca | www.eurimage.com |
| IRS-1C/1D | LISS3 | 142-148 | <i>non renseigné</i> | ISA | www.isro.gov.in | www.eurimage.com |
| | Wifs | 804 | | | | |
| | Pan | 70*70 | | | | |
| Jers-1 | ROS | 75*75 | <i>non renseigné</i> | JAXA | www.jaxa.jp | www.eurimage.com |
| ERS 1, 2 | ROS | <i>non renseigné</i> | oui | ESA | www.esa.int/esaCP/France.html | www.spotimage.fr |
| Spot 1 à 3 | HRV | 60*60 | oui | CNES | www.cnes.fr | www.spotimage.fr |
| Landsat 4, 5 | MSS | 185*170 | <i>non renseigné</i> | NASA et EOSAT | www.nasa.gov | www.eurimage.com |
| | TM | | | | | |
| NOAA | AVHRR | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | www.eurimage.com |
| Landsat 1 à 3 | MSS | <i>non renseigné</i> | <i>non renseigné</i> | NASA et EOSAT | www.nasa.gov | www.eurimage.com |

QUESTIONS PRELIMINAIRES A L'UTILISATION DE L'IMAGERIE POUR LA CARACTERISATION PHYSIQUE A L'ECHELLE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

| | | |
|-------------------|---|-----------|
| Partie 1 - | Quels couples capteur / plateforme choisir ? | 32 |
| Partie 2 - | Images et SIG | 34 |
| Partie 3 - | Quels indicateurs peuvent être extraits des images ? | 37 |
| 1. | Construction d'indicateurs | 37 |
| 2. | Exemples d'indicateurs | 41 |

La caractérisation de l'état physique des corridors alluviaux soulève deux questions préliminaires. Selon l'objectif fixé, il convient, dans un premier temps, de trouver la **meilleure combinaison capteur / vecteur** puis, dans un second temps, de choisir les **variables** et les **indicateurs** les plus appropriés.

Partie 1 - Quels couples capteur / plateforme choisir ?

L'analyse bibliographique sur l'utilisation de l'imagerie pour l'étude des milieux fluviaux réalisée précédemment illustre la diversité des images disponibles et la nécessité d'un choix approprié selon la thématique. Dans cette partie, nous proposons d'utiliser 6 critères pour faciliter le choix d'un type d'image ou d'un couple capteur / vecteur :

- la **résolution spatiale** de l'image conditionne l'identification des objets selon leur taille.
- les **caractéristiques spectrales** : elles jouent un rôle déterminant sur la discrimination des différentes classes d'occupation des sols (eau, végétation, sédiments, ...). L'existence de nombreux canaux favorise généralement la différenciation d'un nombre élevé de classes (ex. : différents habitats forestiers).
- la **répétitivité temporelle** des images : ce paramètre contrôle la fréquence d'acquisition des différents paramètres étudiés. Une fréquence intra-annuelle permet un suivi de la variabilité saisonnière de certains paramètres. Une analyse multi-date peut permettre de bien discriminer certains paramètres (feuillus / résineux par exemple sur des acquisitions hivernales et estivales pour identifier des unités différentes phénologiquement).
- l'**ancienneté** de la base de données. Ce critère est important dans le cas où la caractérisation intègre une approche diachronique de l'objet étudié.
- la disponibilité des images et leur **homogénéité** sur la zone d'étude. La présence d'artefacts sur certaines images peut les rendre inutilisables, il convient donc de s'assurer que la qualité de l'information est identique et bonne sur l'ensemble de la zone d'étude.
- le **coût** d'acquisition des images.

Pour chacun de ces critères nous avons distingué deux ou trois groupes d'images en fonction du niveau d'information fournie et du coût des acquisitions (Tableau 3). Le niveau A correspond aux conditions les plus favorables : information de bonne qualité, forte capacité à discriminer des objets, faible coût, fréquence de passage élevée, données anciennes accessibles. Pour chaque niveau est également indiqué le type d'image ou de couple capteur / vecteur qui permet d'atteindre ce niveau. Afin de trouver le meilleur **compromis sur l'ensemble des critères**, un récapitulatif a été dressé dans le Tableau 4 concernant les images Drone, les orthophotographies, les images satellitaires haute résolution (HR), et les images très haute résolution et extrêmement haute résolution (THR et EHR).

Le croisement des critères confirme l'intérêt des **ortho-photographies** de l'IGN qui fournissent une source d'informations homogènes sur tout le bassin (Perez Correa, 2004). En effet, à l'échelle du réseau hydrographique les images Drone et les images satellitaires THR et EHR s'avèrent trop coûteuses et n'offrent pas la possibilité d'une analyse diachronique à moyen terme. Les images satellitaires HR présentent un niveau de résolution spatiale souvent trop limitée, notamment pour caractériser les cours d'eau de faible

**Questions préliminaires à l'utilisation de l'imagerie
pour la caractérisation physique à l'échelle du réseau hydrographique**

dimension, de rang inférieur à 4. Les deux principales limites des ortho-photographies sont la faible fréquence des prises de vues et l'absence d'informations dans le canal infrarouge.

Tableau 3 : Présentation des différents facteurs déterminant le choix d'un couple capteur / plateforme ou d'un type d'image

| Critère | Classes* | | Couple capteur / plateforme ou type d'image |
|---|----------|----------------------------|---|
| Résolution spatiale | | | |
| | A | surface objet < 0,04 m² | largeur pixel < 0,1 m |
| | B | 0,04 - 100 m² | 0,1-5 m |
| | C | > 100 m² | > 5 m |
| Drone, hélicoptère ortho-photographies IGN; satellites optiques THR et EHR satellites optiques HR | | | |
| Résolution spectrale (remarque : le choix dépend des objets que l'on souhaite caractériser) | | | |
| | A | radars | satellites radars |
| | B | optique-infrarouge | satellites optique infrarouge (Terra, Spot 5) |
| | B | optique-visible | ortho-photographies IGN; satellites optique visible |
| Temporalité | | | |
| Fréquence | A | intra-annuelle | satellites / drone |
| | B | pluriannuelle | orthophotographies IGN |
| Ancienneté | A | > 50 ans | ortho-photographies IGN |
| | B | 10 - 30 ans | Landsat, Spot 4 |
| | C | < 10 ans | drone / autres satellites |
| Homogénéité de la zone couverte | | | |
| | A | Très bonne | ortho-photographies IGN |
| | B | bonne | Drone (variation de la luminosité entre les clichés) |
| | C | incertaine | satellites optiques |
| Coût | | | |
| tronçon 1*1km | A | faible (<100€) | ortho-photographies IGN |
| | B | moyen (100-1000€) | satellites Terra et Landsat |
| | C | élevé (>1000€) | drone / autres satellites |
| tronçon 1*10km | A | faible (<1000€) | satellites Terra et Landsat / ortho-photographies IGN |
| | B | moyen (1000-10000€) | autres satellites |
| | C | élevé (>10000€) | drone |
| tronçon 1*100km | A | faible (<1000€) | satellites Terra et Landsat |
| | B | moyen (1000-10000€) | autres satellites / ortho-photographies IGN |
| | C | élevé (>10000€) | drone |

* A : bon ; B : moyen ; C : médiocre

Tableau 4 : Présentation des niveaux de satisfaction

| | Résolution spatiale | Résolution spectrale | Temporalité | | Homogénéité | Coût | | |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|---------------|----------------|-----------------|
| | | | Fréquence | Ancienneté | | Tronçon 1*1km | Tronçon 1*10km | Tronçon 1*100km |
| Drone | A | A/B | A | C | B | C | C | C |
| Ortho-photographies | B | B | B | A | A | A | A | B |
| Satellites optiques THR / EHR | B | A/B | A | C | C | B/C | B/C | B/C |
| Satellites optiques HR | C | A | A | B | C | C | A | A |

A : bon ; B : moyen ; C : médiocre

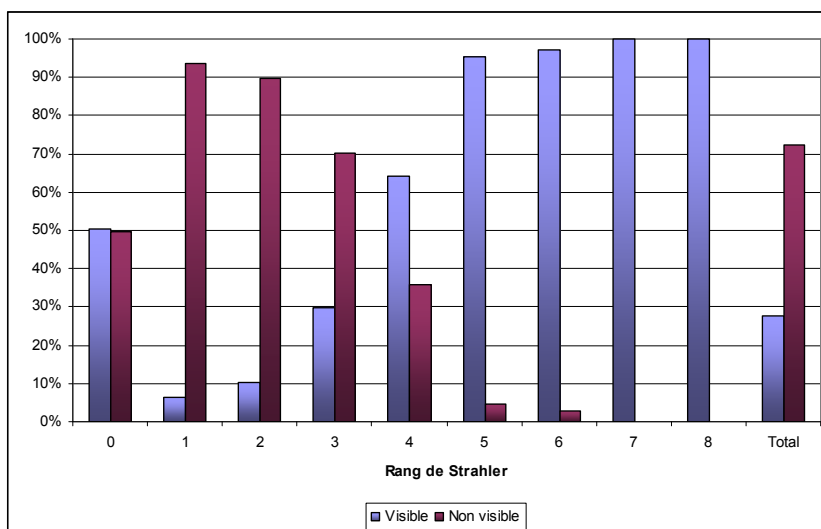
Partie 2 - Images et SIG

L'utilisation des données images pour caractériser un réseau hydrographique peut s'avérer d'autant plus intéressante si les informations obtenues sont combinées avec des données déjà vectorisées (ex. : BD Topo®) dans un Système d'Information Géographique.

La base de données BD Topo® est la description métrique 3D du territoire et de ses infrastructures (http://www.ign.fr/rubrique.asp?rbr_id=1621&lng_id=FR). Elle contient également des informations en termes d'occupation du sol (réseau hydrographique, réseau ferré). Cette base de données offre l'avantage d'être une source de données déjà interprétées et uniforme sur l'ensemble du territoire. Son utilisation évite donc la phase d'extraction de l'information à partir des images brutes. Cependant, cette caractéristique constitue également un inconvénient (Tableau 5). L'absence d'accès à l'image d'origine rend en effet relativement opaque les choix retenus lors de l'interprétation des photographies et la configuration de certains objets ne correspond pas toujours à la dernière date de mise à jour. Certaines des données utiles à la caractérisation des cours d'eau peuvent être représentées sur la base de critères non décidés par l'utilisateur. Par exemple, dans le cas de la largeur du chenal, celle-ci n'est plus représentée en-dessous de 7,5 m que par un trait simple ne donnant pas d'information sur la largeur du chenal. La Figure 14 montre que, dans la BD Topo, cette largeur du chenal est représentée réellement sur moins de 30% du réseau hydrographique de façon continue. De plus, certains départements ne sont pas couverts et certains niveaux d'informations ne sont pas accessibles (ex. : nature de la végétation = pionnière, herbacée, forêts matures□) ou alors de façon partielle (ex. : présence des bancs de galets). Enfin, l'utilisation de la BD Topo ne permet pas les comparaisons diachroniques sur la base des mêmes traitements mais elle reste un complément d'informations aux images.

Tableau 5: Présentation des avantages et inconvénients de la BD Topo® par rapport aux images

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| Interprétation | |
| - Déjà faite = gain de temps | - Pas d'accès à l'information brute - Non maîtrise de l'interprétation : manque des informations (végétation, galets) choix arbitraire de la représentation des données (par exemple, largeur des chenaux < à 7,5m (Figure 15 Erreur ! Source du renvoi introuvable.)) |
| Homogénéité | |
| - Données vectorisées et uniformes sur l'ensemble du territoire | |
| Temporalité | |
| | - Ancienneté de l'information inexistante |



**Figure 14 : Pourcentage du réseau hydrographique du bassin versant du Rhône pour lequel la largeur du chenal est une information disponible au sein de la BD Topo.
Représenté en fonction de la taille du cours d'eau (ordre de Strahler ; 0 : rang non défini)**

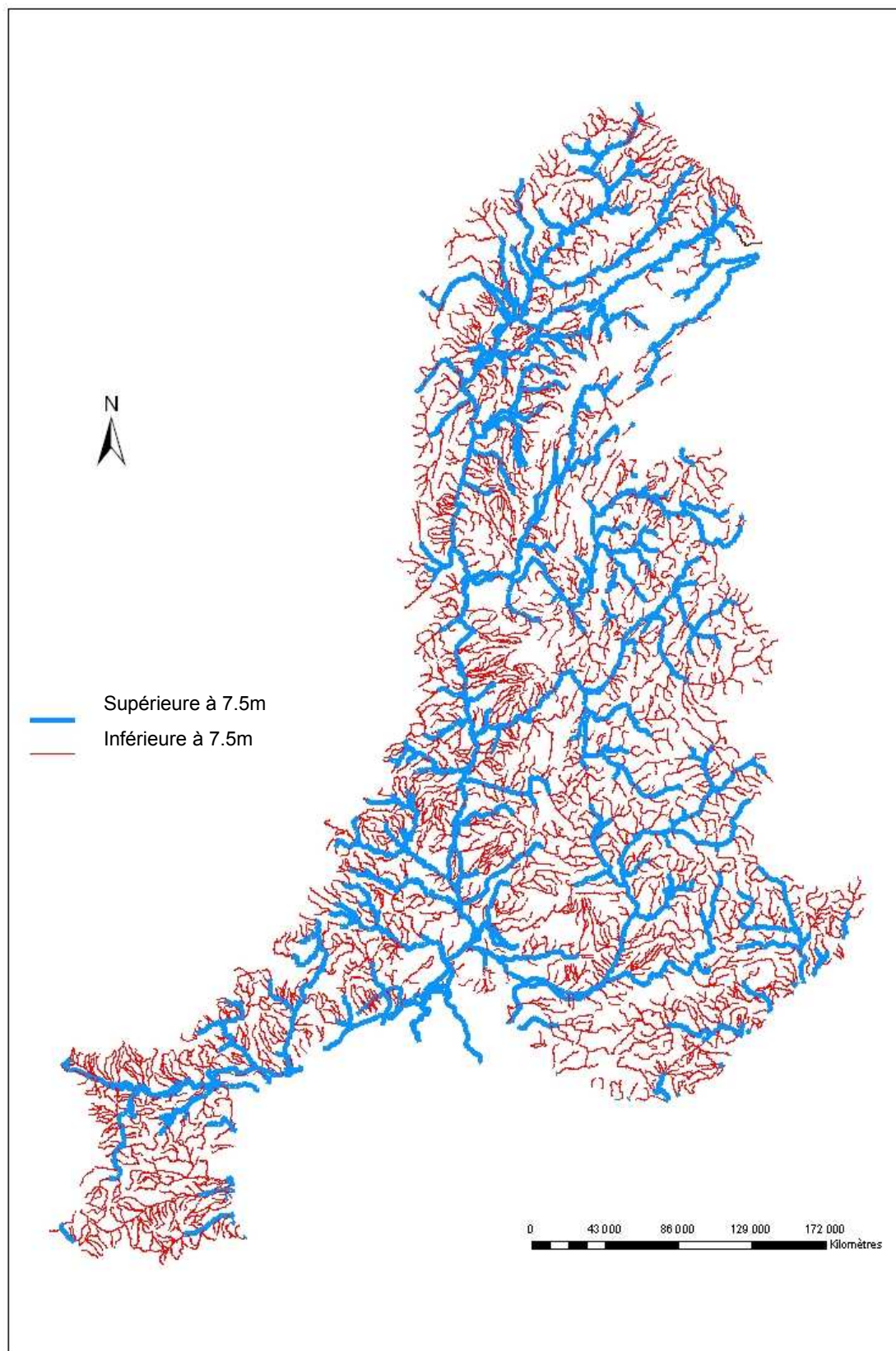


Figure 15 : Réseau hydrographique du district Rhône Méditerranée dont la largeur est supérieure à 7.5 m (Source : IGN-BD Topo). Remarque : Aucun indicateur, par exemple, de la géométrie de la bande active ne pourra être renseigné sur les cours d'eau de faible taille (en rouge)

Partie 3 - Quels indicateurs peuvent être extraits des images ?

1. CONSTRUCTION D'INDICATEURS

Une fois que le type d'image a été sélectionné, il faut construire les indicateurs qui permettent de répondre à la question posée. Un **indicateur** est *un paramètre ou une combinaison de paramètres qui indique un état ou une évolution utilisés pour établir un diagnostic et mettre en place une politique d'actions planifiée à l'échelle d'un territoire ou pour réaliser un suivi permettant de mesurer l'efficacité d'actions* (Figure 16). Le choix d'un indicateur est évidemment basé sur le (ou les) objectif(s) de départ. Dans notre cas il s'agit de caractériser l'état physique du réseau à un instant t et observer son évolution dans le temps. Pour cela, il convient de suivre le protocole de construction d'un indicateur suivant :

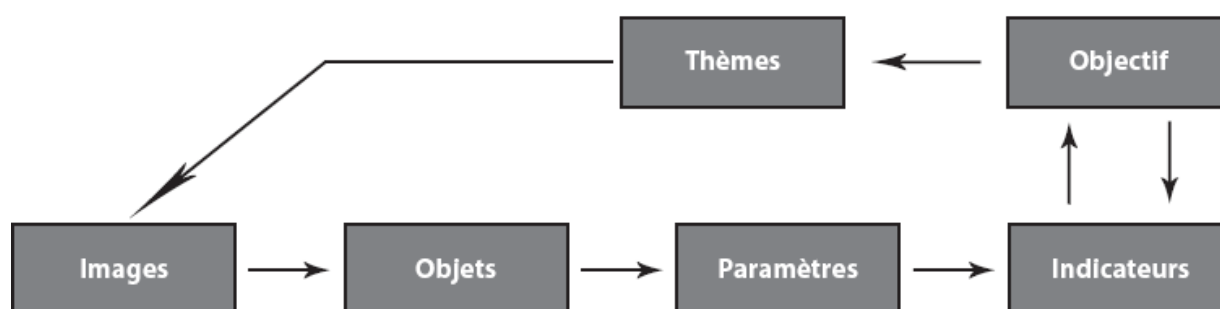


Figure 16 : Présentation de la démarche de création d'indicateurs

Etape 1 : Extraction des objets élémentaires

A partir de l'image, il est possible d'extraire des objets : éléments liquides, éléments biologiques, éléments minéraux, éléments anthropiques du paysage. Ces objets élémentaires peuvent prendre trois formes distinctes : ponctuelle, surfacique ou linéaire. Notons que la qualité d'identification de certains objets n'est pas la même dans l'espace et dans le temps (effet des saisons, effets des débits). En fonction de la date à laquelle est prise le cliché, il ne sera pas toujours aussi évident d'en extraire toutes les informations théoriquement disponibles (Tableau 6). Dans la partie amont du réseau, une faible largeur du chenal devient un facteur limitant pour extraire cet objet et donc pour renseigner tous les indicateurs qui en découlent. Le même problème est rencontré lorsque la canopée dense masque le chenal. De même, les informations liées aux bancs de galets, comme leur granulométrie ou leur taille, ne pourront pas être obtenues dans la partie aval du réseau où la géométrie du chenal se traduit souvent par l'absence de bancs émergés visibles.

Tableau 6 : Exemples de conditions nécessaires à une bonne identification des objets

| Objet | Conditions |
|--|---|
| Bancs de galets non végétalisés Chenal en eau | Extension variable en fonction du débit et de la canopée de la végétation riveraine |
| Ouvrages longitudinaux (digues) | Ne doivent pas être recouverts de végétation |
| Ouvrages transversaux (épis, barrages, seuil) | Inférieur au débit à plein bord pour les petits ouvrages |
| Type de fond (végétation aquatique, sédiments, ...) | Clarté de l'eau au moment de l'acquisition |
| Végétation (espèces végétales, mature, pionnière) Zones humanisées (habitats, cultures, industries) | Tenir compte des périodes phénologiques |

Etape 2 : Constitution d'une bibliothèque de paramètres

A partir des objets identifiés, il est possible de dresser une liste de paramètres quantitatifs et qualitatifs potentiellement accessibles (ex. : largeur du chenal, surface des bancs de galets, nature de la végétation...) (Tableau 7). Ces paramètres peuvent être utilisés pour aborder plusieurs thèmes : morphologie, habitats écologiques, anthropisation. Cependant, il existe plusieurs niveaux d'information et de complexité de ces variables : nature des objets élémentaires, variables d'aggrégations spatiales ou variables temporelles.

Etape 2a : Caractérisation des objets élémentaires

Les objets identifiés peuvent être caractérisés à partir de leur radiométrie ou de paramètres géométriques et texturaux. Cette étape permet de préciser la nature des objets (ex. : peupleraie, prairie...) ou de quantifier un paramètre localement (ex. : taux de MES, granulométrie des sédiments émergés...)

Etape 2b : Construction de paramètres par agrégation spatiale

Dans ce cas, la variable est renseignée par la combinaison soit de plusieurs variables soit de plusieurs objets à une échelle spatiale plus vaste (ex. : densité, diversité paysagère, nombre de chenaux, paramètres moyens comme la largeur, la profondeur, l'indice de sinuosité ou le nombre de ponts par kilomètre de cours d'eau).

Etape 2c : Construction de paramètres temporels par agrégation d'états

Lorsque plusieurs états temporels sont disponibles, il est possible de combiner ces états pour obtenir des variables dynamiques : taux d'érosion des berges, taux de rétraction de la bande active, turnover des habitats, évolution surfacique de tel ou tel habitat...

Tableau 7 : Exemple de paramètres pouvant être extraits de l'imagerie (liste non-exhaustive)

Identification des objets élémentaires (points, lignes, surfaces)

| Eau | Paysage riverain Sédiments | Végétation | Objets anthropiques | | Relief |
|---|------------------------------------|--|---|--|--------|
| | | | Occupation du sol | Aménagements | |
| chenal en eau, type de fond (végétation aquatique, sédiments□) | bancs de galets non végétalisés | végétation (espèces végétales, unités physiologiques) | habitats, cultures, industries, extraction de granulats□ | ouvrages longitudinaux (digues), ouvrages transversaux (barrages, seuil) | vallée |

Paramètres renseignés

| | | | | | |
|---|--|---|---|---------------------------------------|------------------------|
| largeur moyenne de la bande active ¹ | nature des sédiments | nature des unités, des espèces | surface de zones agricoles | présence d'aménagements | longueur de la vallée° |
| nombre de chenaux en eau ¹ | tailles des particules (D50, D90) | surface des habitats | surface de zones habitées | densité des aménagements ¹ | pente de la vallée° |
| longueur cumulée des chenaux | surface des bancs | stress hydrique | surface de cultures | longueur endiguée ¹ | présence de terrasses° |
| amplitude d'un méandre | indices granulométriques (Skewness, Kurtosis□) | densité de végétation ¹ | nature des cultures | | |
| profondeur du chenal | | diversité paysagère ¹ | développement de l'urbanisation ² | | |
| concentration en MES | | biomasse | | | |
| érosion des berges ² | | taille des individus | | | |
| rétraction de la bande active ² | | turn-over des habitats ² | | | |
| pente du lit° | | évolution surfacique des habitats ² | | | |
| nature du fond | | | | | |
| nature de l'écoulement (turbulence) ¹ | | | | | |
| faciès ¹ | | | | | |

¹ obtenu par agrégation spatiale ² obtenu par combinaison d'états

° traitement par
photogrammétrie

Etape 3 : Construction de l'indicateur

Enfin, à partir de la bibliothèque de paramètres (qui peut être complétée si besoin) et l'objectif fixé en termes d'indications, un indicateur est élaboré. Généralement, il est possible de distinguer les **indicateurs d'état ou de structure spatiale** des **indicateurs d'évolution**. Le tableau 8 présente des exemples de différents indicateurs pouvant servir à la caractérisation des corridors alluviaux. Certains indicateurs sont déjà largement utilisés, comme ceux concernant le style fluvial qui, pour certains ont été développés dès les années 1950. D'autres indicateurs sont à affiner, voire à créer, comme ceux faisant référence à l'anthropisation du système : à partir de quelles limites peut-on considérer que les aménagements ont un impact important sur la continuité du réseau ? Existe-t-il une densité limite d'aménagements au-delà de laquelle l'impact est irréversible ?

Tableau 8 : Liste d'indicateurs pouvant être extraits à partir de l'imagerie (liste non-exhaustive)

| Thèmes | Indicateurs | Sens possibles | |
|---------------------------|---------------------------|--------------------|--|
| Anthropique | soils anthropisés (%) | Elevé | → pression forte sur la naturalité du corridor fluvial |
| Ecologie / Anthropique | indice de fragmentation | Fort | → corridor discontinu fragmenté par les pressions humaines |
| Ecologie | végétation mature (%) | Fort | → pas de renouvellement des habitats; système vieillissant |
| Ecologie / Morphologie | digues | Présence | → déconnexion lit mineur / lit majeur |
| Ecologie / Morphologie | ouvrages longitudinaux | Forte densité | → réduction de l'espace de mobilité |
| Morphologie | bancs de galets (surface) | Elevée | → stockage sédimentaire |
| Morphologie / Anthropique | barrages, réservoirs | Présence | → piégeage des sédiments, écrêter des crues à l'aval |
| Morphologie / Anthropique | digues | Présence | → modification de la dynamique latérale |
| Morphologie / Anthropique | extraction en lit mineur | Présence | → transport solide perturbé, érosion régressive et progressive |
| Morphologie | indice de sinuosité | $Is < 1,05$ | → style fluvial rectiligne |
| | | $1,05 < Is < 1,50$ | → style fluvial sinueux |
| | | $Is > 1,50$ | → style fluvial méandrique |
| Morphologie | indice de tressage | Fort | → tressage actif |
| Morphologie / Anthropique | ouvrages transversaux | Présence | → modification des flux (continuité amont/aval) |
| Morphologie | végétation pionnière (%) | Elevé | → secteur dynamique |

2. EXEMPLES D'INDICATEURS

A partir d'exemples simples, il s'agit d'illustrer des **indicateurs potentiels** permettant de caractériser le réseau hydrographique en fonction d'une question précise.

Question 1. Quels sont les secteurs déficitaires en sédiments à la suite de pressions anthropiques ?

Pour répondre à cette question, il est possible de coupler deux approches :

- 1 □ la localisation des ouvrages à l'origine de l'impact (extraction de granulats, barrages et réservoirs associés). L'indicateur est la présence d'ouvrages interrompant le transit sédimentaire, indicateur potentiel d'un déficit.
- 2 □ le pourcentage de disparition des bancs à l'aval de ces ouvrages observé sur un ensemble de segments donnés à partir d'une comparaison de différents états temporels (Définir la longueur des segments et la période de temps étudiés)

Question 2. Quels sont les tronçons qui sont instables latéralement ?

Deux approches sont envisageables, la première est grossière mais facile à mettre en œuvre et repose sur la **proportion de végétation pionnière** au sein du corridor naturel bordant le cours d'eau (obtenue par reconnaissance d'objets et agrégation spatiale). La seconde nécessite de disposer de deux états afin de calculer la **superficie érodée** entre deux dates (Figure 17).

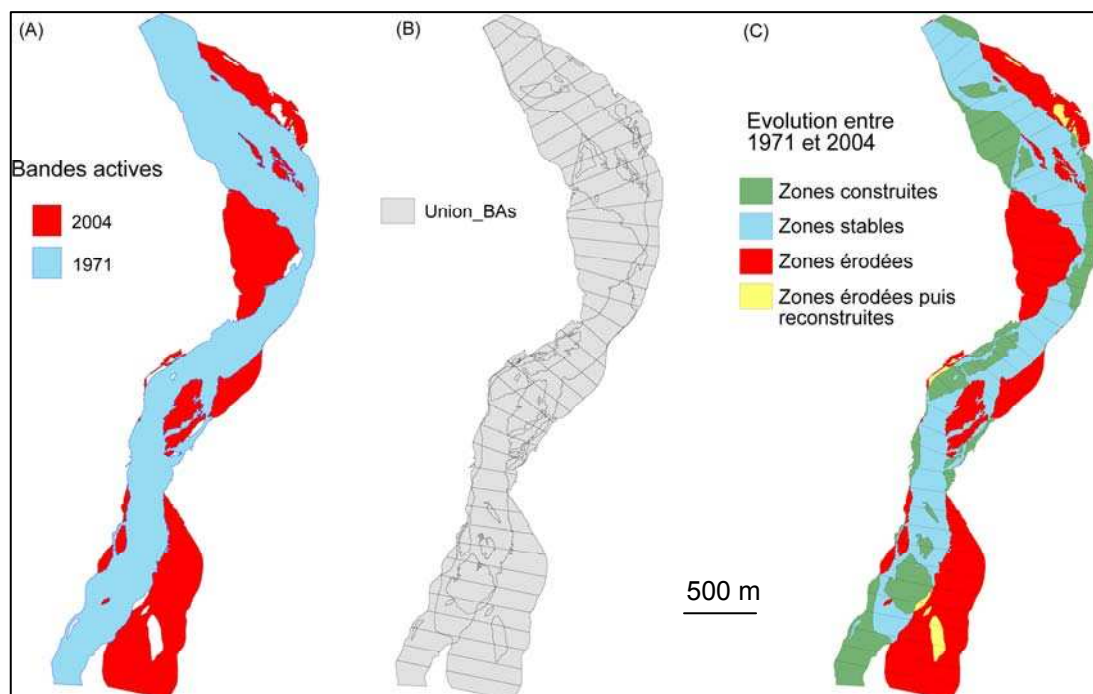


Figure 17 : Exemples du Buech

Question 3. Quelles sont les tronçons où la variabilité des faciès d'écoulement (habitat) est la plus élevée ?

Cette question peut être abordée au moyen d'une approche hiérarchisée. Celle-ci consiste à extraire l'information à une échelle aussi fine que possible (par exemple par le biais d'une segmentation du cours d'eau à 10 ou 50 m). Ensuite, cette donnée est utilisée afin de dégager des tronçons géomorphologiques homogènes au sein desquels l'indicateur est renseigné. Dans le cas des faciès d'écoulement, il est possible d'extraire à partir du chenal en eau des informations comme la **largeur du lit mouillé et la variabilité radiométrique des pixels** sur la base d'une segmentation à 10 m. La variabilité de faciès est obtenue à partir de ces indicateurs couplés avec la **géométrie en plan du chenal** (sinuosité / présence de bancs). Notons que cette caractérisation sera probablement confrontée aux problèmes suivants : débits non uniformes entre les photographies ; variabilité de la réponse de l'indicateur en fonction des hauteurs d'eau et variabilité des conditions de prise du cliché.

Question 4. Identifier les secteurs en fonction de la continuité du corridor végétal riverain

A partir d'un corridor naturel extrait par analyse d'images en distinguant la rive gauche de la rive droite plusieurs indicateurs peuvent être renseignés, par exemple la **densité de discontinuité** par km de cours d'eau, en comptant le nombre de fois où le corridor végétal est interrompu sur le linéaire fluvial.

A partir d'un corridor naturel extrait par analyse d'images, l'absence de zone tampon peut être également mise en évidence en utilisant, par exemple, la **distance minimale entre la bande active et l'espace anthropisé le plus proche**. Comme pour la question des faciès, cette donnée peut être obtenue par segment de 10 m puis ensuite **réaggrégée** afin d'obtenir des tronçons homogènes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bates HD, DeRose RC. (1999). Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion. *JAG* 1(2), p. 91-101.
- Bel Hadj Ali A. (2001). Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques. Application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques, Thèse de doctorat en sciences de l'information géographique, Université de Marne-La-Vallée, 210 p.
- Bisson PA, Nielson JL, Palason RA, Grove LE. (1982). A system of naming habitat types in small streams, with examples of habitat utilization by salmonids during low stream-flow. In *Acquisition and Utilization of Aquatic Habitat Inventory Information*, Proceedings American Fisheries Society, Portland, OR, Amrantrout NB (ed.), p. 62-73.
- Bonn F. & Rochon G. (1992). Précis de télédétection, Volume 1, Principes et méthodes. PUQ/AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.
- Brasington J, Langham J, Rumsby B. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology* 53, p. 299-316.
- Bryant R and Gilvear DJ. (1999). Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing, river Tay. *Scotland* 23, p. 1-15.
- Butler JB, Lane SN, Chandler JH, Porfiri K. (2002). Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments. *Photogrammetric Record* 17(99), p. 419-439.
- Butler JB, Lane SN, Chandler JH. (2001). Characterization of the structure of river-bed gravels using two-dimensional fractal analysis. *Mathematical Geology* 33(3), p. 301-330.
- Carbonneau PE, Bergeron NE, Lane SN. (2005). Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research* 41(11): Article No. W11426.
- Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. (2003). Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *International Journal of Remote Sensing* 24(14), p. 2837-2854.
- Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. (2004). Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery. *Water Resources Research* 40(7): Article No. W07202.
- Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. (2006). Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Landforms* 31(11), p. 1413-1423.
- Carbonneau PE. (2005). The threshold effect of image resolution on image-based automated grain size mapping in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Landforms* 30, p. 1687-1693.
- Chaponnière P. (2004). Télédétection et bathymétrie des rivières : application à la Durance. Mémoire non publié, ENSG/CEMAGREF.
- Desjardins R. (2000). La télédétection : perspective analytique Paris, ESTEM, 226 p.
- Dufour S. (2005). Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines. Exemples de différents hydrosystèmes rhodaniens. Thèse non publiée: 243.
- Eykens C. (2007). La régionalisation de l'érosion latérale et ses facteurs discriminants. Mémoire de Master 1, Université Lyon 2, 68 p.
- Gilvear DJ, Davids C, Tyler AN. (2004). The use of remotely sensed data to detect hydromorphology; River Tumme, Scotland. *River Research and Applications* 20(7), p. 795-811.
- Girard M.C & Girard C.M. (2004). Traitement des données de télédétection, Paris Dunod, 529 p.
- Muller E. (1997). Mapping riparian vegetation along rivers : old concepts and new methods. *Aquatic botany*, 58, p. 411-437.
- Girel J. (1986). Télédétection et cartographie à grande échelle de la végétation alluviale : exemple de la basse plaine de l'Ain. Dans P. Ozenda, Documents de Cartographie Écologique, XXIX, p. 45-74.
- Gomez B, Phillips JD, Milligan FJ, Janes LA. (1997). FloodPlain sedimentation and sensitivity: summer 1993 flood, Upper Mississippi river valley. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, p. 923-936.
- Igouzal et al. (2003) Reconstitution de la morphologie d'une rivière à méandres par l'utilisation de la photogrammétrie numérique : exemple du Sébou, MAROC. *Bulletin SFPT* n° 171 (2003-3).
- Institut Français de l'Environnement □ Office Nationale de la Chasse et de la faune sauvage. (2005). Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des gravières. Document technique. 134 p.
- Lane SN, James TD, Crowell MD. (2000). Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *Photogrammetric Record* 16, p. 793-821.
- Lane SN, Westaway RM, Hicks DM. (2003). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, p. 249-271.
- Legleiter CJ, Marcus WA, Lawrence R. (2002). Effects of sensor resolution on mapping in-stream habitats. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68(8), p. 801-807.
- Lejot J. (2008). Suivi des formes fluviales par télédétection à très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de l'Ain et du Haut-Rhône (Chautagne). Thèse de Géographie, Université Lyon 2. 257 p.

- Lejot J, Delacourt C, Piégay H, Fournier T, Trémélo ML, Alleman P. (2007). Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms* 32(11), p. 1705-1725.
- Lorang MS, Whited DC, Hauer FR, Kimball JS, Stanford JA. (2005). Using airborne multispectral imagery to evaluate geomorphic work across floodplains of gravel-bed rivers. *Ecological Applications* 15(4), p. 1209-1222.
- Marcus AW, Legleiter CJ, Aspinall RJ, Boardman JW, Crabtree R. (2003). High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams. *Geomorphology* 55, p. 363-380.
- Marcus WA. (2002). Mapping of stream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. *Journal of Geographical Systems* 4(1), p. 113-126.
- Marcus et Fonstad (2007). Optical remote mapping of rivers at sub-meter resolutions and watershed extents. *Earth Surfaces Processes and Landforms*.
- Mariko A., Mahé G., et Servat E. (2003). Les surfaces inondées dans le delta intérieur du fleuve Niger au Mali par NOAA/AVHRR. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 172, p. 61-68.
- Marston RA, Girel J, Pautou G, Piégay H, Bravard JP, Arneson C. (1995). Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology* 13, p. 121-131.
- Mertes LAK, Smith MO, Adams JB. (1993). Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. *Remote Sensing of the Environment* 43, p. 281-301.
- Miranda FP, Fonseca LEN, Carr JR. (1998). Semi-variogram textural classification of JERS-1 SAR data obtained over a flooded area of the Amazon rainforest. *International Journal of Remote Sensing* 19, p. 549-556.
- Mobley CD, Sundman LK. (2001). *Hydrolight 4.2 user's guide*. Redmon, WA: Sequoia Scientific.
- Nykanen et al. (1998). Study of spatial scaling in braided river patterns using synthetic aperture radar imagery. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 34, NO. 7, PAGES, p. 1795-1807.
- Perez Correa M. (2004). Développement d'une méthode de cartographie de l'occupation du sol le long des cours d'eau à partir de données de télédétection. *Mémoire de Mastère spécialisé de la Conférence des Grandes écoles*, 44 p.
- Piégay H, Darby SA, Mosselmann E, Surian N. (2005). The erodible corridor concept: applicability and limitations for river management. *River Research and Applications* 21, p. 773-789.
- Puestow TM, Simms EL, Simms A, Butler K. (2001). Mapping of salmon habitat parameters using airborne imagery and digital ancillary data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67(3), p. 309-317.
- Puissant A. (2003). *Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain*, Thèse de doctorat en géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France, 349 p. + annexes.
- Raclot (2003). Télédétection des niveaux d'eau en plaine inondée, démarche spatiale guidée par le fonctionnement hydraulique. *Bulletin SFPT n° 172* (2003-4).
- Rainey MP, Tyler AN, Bryant RG, Gilvear DJ, McDonald P. (2000). The influence of surface and interstitial moisture on the spectral characteristics of inter-tidal sediments; implications for airborne image acquisition and processing. *International Journal of Remote Sensing* 21, p. 3025-3038.
- Robin M. (1995). *La télédétection*. Paris, Nathan, 318 p.
- Slater L. (2007). *Caractérisation des rivières en tresses françaises*. Mémoire de Master 1. ENS Lettres et Sciences Humaines, 57 p.
- Thomas M. (2007). *Apport de la télédétection dans la compréhension de la dynamique des rivières en tresses*. Mémoire de Master 2, Université de Rennes, 53 p.
- Verdu JM, Batalla Ramon J, Martinez-Casasnovas JA. (2005). High-resolution grain size characterisation of gravel bars using imagery analysis and geo-statistics. *Geomorphology* 72, p. 73-93.
- Westaway RM, Lane SN, Hicks DM. (2000). Development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 25(2), p. 200-226.
- Westaway RM, Lane SN, Hicks DM. (2001). Airborne remote sensing of clear water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67(11), p. 1271-1281.
- Westaway RM, Lane SN, Hicks DM. (2003). Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *International Journal of Remote-Sensing* 24(4), p. 795-815.
- Whited D, Stanford JA, Kimball JS. (2002). Application of airborne multispectral digital imagery to quantify riverine habitats at different base flows. *River Research and Applications* 18(6), p. 583-594.
- Wiederkehr E. (2006). *Evolution de la mobilité des berges du Petit Rhône à une échelle pluri-décennale*. Mémoire de Master 2, Université de Provence, 50 p.
- Winterbottom SJ, Gilvear DJ. (1997). Quantification of channel-bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography. *Regulated Rivers: Research and Management* 13(6), p. 489-499.

Winterbottom SJ, Gilvear DJ. (2000). A GIS-Based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated river Tummel, Scotland
Regulated rivers. Research & Management 16, p. 127-140.